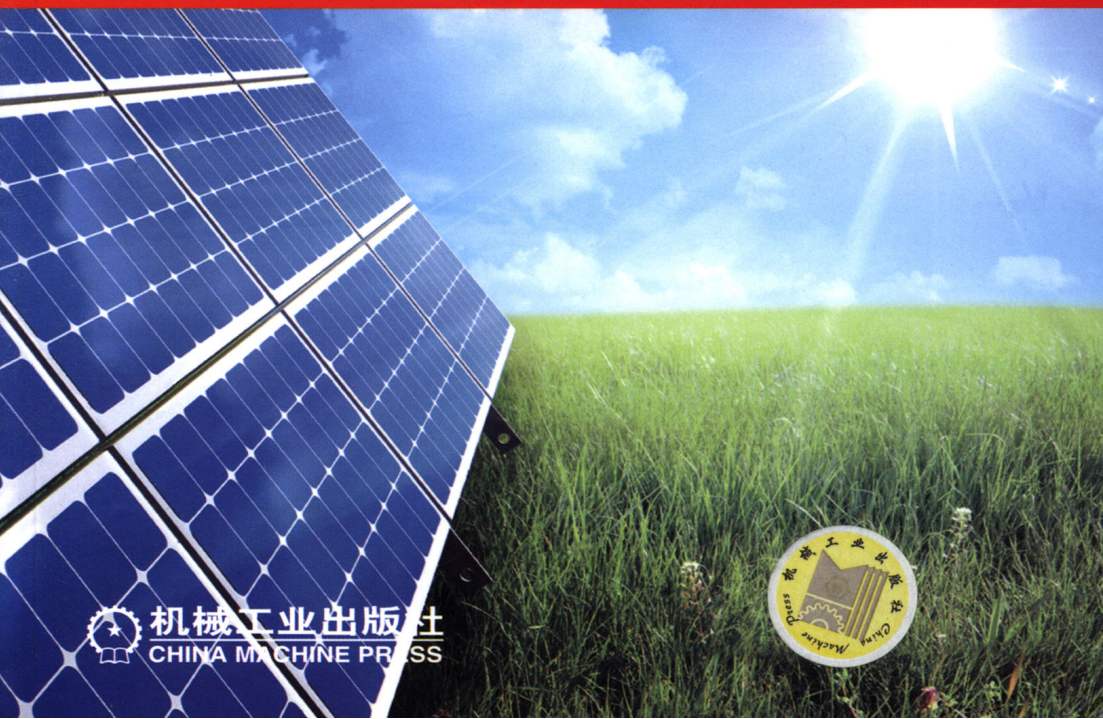
CRC Press
Taylor & Francis Group

（美）David Thorpe
Frank Jackson 编著

刘宝林 朱丽虹 蔡加法 译

太阳能技术知识读本

Solar Technology:
The Earthscan Expert Guide to Using Solar Energy for Heating, Cooling and Electricity



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

关于本书

人们的生活永远都离不开太阳，地球上的绝大部分能源也来自太阳！本书主要介绍了利用太阳能进行加热、制冷以及发电的相关技术，通过实例简述了各种太阳能技术设备的工作原理和使用原则及方法，并论述了太阳能在节能环保中的重要作用。

太阳能技术知识读本

（美）David Thorpe
Frank Jackson 编著

刘宝林　朱丽虹　蔡加法　译

机 械 工 业 出 版 社

Solar Technology: The Euthscan Expen Guide to Using Solar Eneigy foi Heating, Cooling and Electricity, by Dav id Thorpe @ 2011 by Taylor & Francis Group. LLC

Authorize d translation from English Language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC. All Rights Reserved 本书原版由 Taylor & Francis 出版集团旗下 CRC 出版公司出版，并经其授权翻译出版，版权所有，侵权必究。

本书中文简体翻译版授权机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售，未经出版者书面许可，不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

Copies of this book sold without a Taylor & Franc is sticker on the cover are unauth orized and illegal 本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签，无标签者不得销售。

本书版权登记号：图字 01-2012-5873 号

图书在版编目（CIP）数据

太阳能技术知识读本/(美) 索普（Thorpe，D.），(美)杰克逊(Jack-son，F）编著；刘宝林，朱丽虹，蔡加法译. —北京：机械工业出版社. 2013. 10

书名原文：SolarTec hnology

ISBN 978-7-111-43991- 2

Ⅰ. ①太… Ⅱ. ①索…②杰…③刘…④朱…⑤蔡… Ⅲ. ①太阳能技术 Ⅳ. ①TK51

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2013）第 214911 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）
策划编辑：张俊红 责任编辑：张俊红 责任校对：肖 琳
版式设计：霍永明 封面设计：路恩中 责任印制：杨 曦
北京市四季青双青印刷厂印刷
2014 年 1 月第 1 版第 1 次印刷
140mm ×203mm • 10.75 印张 • 298 千字
0 001 — 3 000册
标准书号：ISBN 978-7-111-43991-2
定价：49.80元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部 调换

电话服务 网络服务
社 服 务 中 心:(010)88361066 教材网:http://www.cmpedu.com
销 售 一 部:(010)68326294 机工官网:http://www.cmpbook.com
销 售 二 部:(010)88379649 机工官博:http://weibo.com/cmp1952
读者购书热线:(010)88379203 封面无防伪标均为盗版

译 者 序

从20世纪70年代以来，随着全球气候变暖的日益严重以及“可持续发展”的观念逐渐深入人心，太阳能逐渐受到世界各国的关注。太阳能是太阳内部连续不断的核聚变反应过程产生的能量。与矿物能源相比，太阳能有明显的优越性，它是一种没有污染、取之不尽、用之不竭的清洁能源，适用范围广，既可免费使用，又无需运输，对环境无任何污染。在各国政府的大力支持下，全球的太阳能产业得到了快速的发展。世界太阳能电池的年增长率已经连续10年超过30%，超过了信息技术（IT）产业，已经成为世界上发展最快的产业之一。2007年，我国的太阳能电池产量超过欧洲和日本，成为世界第一。另外，我国太阳能资源非常丰富，理论储量达到每年17000亿吨标准煤，太阳能资源开发利用的潜力非常广阔。普遍推广太阳能技术，对于改善地球的整体环境有着非常重要的意义。

提及太阳能利用技术，我们首先想到的可能就是太阳能热水器和太阳能光伏发电。实际上，除此之外，太阳能还可以用于建筑物供暖与通风、海水淡化、饮用水净化、食品烹饪、物品烘干，甚至出乎大多数人的意料，太阳能还可以在夏季为建筑物制冷！本书以生动易懂的语言详细地介绍了各种太阳能利用技术的工作原理，以图文并茂的形式和生动翔实的实例解释了各种太阳能技术及其设备的一般使用原则和方法。阅读本书之后我们可以发现，太阳能利用技术不但可以为我们节省金钱，创造温暖舒适的生活和工作环境，甚至可以影响我们的行为方式，产生意想不到的效益。作者还试图告诉我们，太阳能技术的利用不一定意味

着需要付出高昂的代价，也不一定需要高科技的产品或设备，有时候甚至可以自己动手做（DIY）！

由于历史、技术和经济等方面的原因，太阳能技术还未能深入到我们每个人的心中，我国的太阳能利用技术也主要集中在太阳能热水器和太阳能光伏发电这两个主要领域，而太阳能绿色建筑、太阳能热发电等在欧美发达国家大力推行的太阳能利用技术我们还知之甚少，因此希望本书能够给广大社会人士普及一些太阳能利用知识，让人们更进一步认识和利用这取之不尽的绿色资源以减少碳排放、实现节能环保。本书的翻译出版若能够助广大太阳能技术领域的设计、开发和生产以及安装和维护等相关技术人员一臂之力，为我国的太阳能技术尽一份绵薄之力，那将是我们最大的满足。

本书的翻译工作是由刘宝林、朱丽虹和蔡加法共同完成的。另外，参与本书资料整理及部分翻译等相关工作的还有曾凡明、张玲、刘维翠、刘威、陈志远、林飞、王顺清、黄艳东、吕毅军、高玉琳等，在此表示感谢。书中少量专有名词国内尚无统一译法，有些环保组织、慈善机构、公司及网站等在国内没有统一或者相应的称呼，我们参考大量资料，力求准确译出，为避免读者产生歧义，文中仍然保留原英文名称。另外，由于译者水平所限，疏漏、错误和不妥之处在所难免，希望广大读者不吝指正。

译　者

缩 略 语

AC alternating current 交流电

BCH Banco Central Hipotecario 中央抵押银行

BIPV building-integrated photovoltaics 光伏建筑一体化

BRE Building Research Establishment 建筑研究院

BTES borehole thermal energy storage 孔储热

Btu British thermal unit 英制热单位

CDM Clean Development Mechanism 清洁能源发展机制

CFLR compact Fresnel lens reflector 紧凑型菲涅尔棱镜反射镜

CHP combined heat and power 热电联产

COP coefficient of performance 性能系数

CPC compound parabolic concentrating 复合抛物面集热器

CPV concentrator solar cells 聚光太阳能电池

CSP concentrating solar power 聚光太阳能热发电

DC direct current 直流电

DHW domestic hot water 生活热水

DNI direct normal irradiation 直接辐照度

DTC differential thermostatic controller 微分恒温控制器

ELCC effective load carrying capability 有效负荷承载能力

EPDM ethylene propylene diene monomer 三元乙丙橡胶

ESTELA European Solar Thermal Electricity Association 欧洲太阳能热发电协会

FITs ‘feed-in’tariffs 上网电价

GHI global horizontal irradiation 全球水平面总辐照度

HDDs heating degree days 热度日，用以测定建筑采暖中需要燃料量的单位，1 热度日为温度比室外日平均温度降低 1℃时需要的燃料

HDPE high-density polyethylene 高密度聚乙烯

HVAC heating, ventilation and air conditioning 供暖、通风与空气调节

IEA International Energy Agency 国际能源署

ISE Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems (Freiburg) 夫琅禾费太阳能系统研究所（弗莱堡）

LCOE levelized costs of energy 平均化电力成本

LEDs light emitting diodes 发光二极管

LEED Leadership in Energy and Environmental Design 能源与环境设计先锋奖

LFR Linear Fresnel Reflector 线性菲涅耳反射器系统

MD membrane distillation 膜蒸馏

MEDISCO MEDiterranean food and agro Industry applications of Solar COoling technologies 太阳能制冷技术在地中海食品和农业产业的应用项目

MESoR Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge 太阳能资源知识管理与利用

MPPT maximum power point tracking 最大功率点跟踪

MVHR Mechanical Ventilation with Heat Recovery 机械通风与热回收

nm nanometers 纳米

NREL National Renewable Energy Laboratory 国家可再生能源实验室

PCM phase-change material 相变材料

PEX cross-linked polyethylene 交联聚乙烯

PHPP Passive House Planning (Design) Package 被动房规划设计方案

PPE/PS polyphenylene ether/ polystyrene 聚苯醚/聚苯乙烯

PRINCE Promoters and Researchers in Non-Conventional Energy 非常规能源的推广人员和研究者

PV photovoltaic 光伏

PVC/PU polyvinyl chloride/ polyurethane 聚氯乙烯/聚氨基甲酸酯

PVG-IS Photovoltaic Geographical Information System 光伏地理信息系统

PV/T PV power generation and solar water heating 太阳能光伏发电和太阳能热水器

RO reverse osmosis 反渗透

SHGC solar heat gain coefficient (US) 太阳能热增益系数

SOLEMI Solar Energy Mining 太阳能能源开采

SPH solar pool heating 太阳能泳池加热系统

STC standard test condition 标准测试条件

SVTC Silicon Valley Toxics Coalition 硅谷毒物联盟

SWH solar water heating 太阳能热水器

THERM Two-dimensional building HEat tRansfer Modelling 二维建筑导热模型

TISS Thickness Insensitive Spectrally Selective 厚度不敏感光

谱选择性

UV　ultraviolet　紫外线

VAT　value added tax　增值税

WAPI　Water Pasteurization Indicator　水巴氏灭菌指示器

W/m^2：watts per square metre　瓦/米^2

目　录

译者序

缩略语

第 1 章　引言 …… 1

1.1　技术范围 …… 3

1.2　太阳辐射和地球 …… 5

1.3　间接太阳能 …… 14

1.4　直接辐射和散射辐射 …… 22

1.5　总结 …… 23

参考文献 …… 25

第 2 章　被动式太阳能建筑 …… 26

2.1　五条基本原则 …… 28

2.2　房屋整体设计方案 …… 31

2.2.1　对环境影响最小化 …… 31

2.2.2　太阳能辐射得热 …… 33

2.2.3　烟囱效应 …… 35

2.3　气候的重要性 …… 37

2.3.1　炎热气候条件 …… 37

2.3.2　寒冷气候条件 …… 53

参考文献 …… 84

第3章 太阳能热水器 …… 85

3.1 太阳能热水系统的发展历史 …… 88
3.2 太阳能热水器的工作原理 …… 90
3.3 什么是热量以及应该如何收集它 …… 91
3.4 太阳能集热器的类型 …… 92
3.4.1 平板集热器 …… 92
3.4.2 闷晒式太阳能热水器 …… 96
3.4.3 真空管集热器 …… 96
3.4.4 聚合物材料集热器 …… 102
3.5 太阳能热水系统的分类 …… 104
3.5.1 被动式系统（通常指热虹吸系统） …… 105
3.5.2 主动式系统 …… 106
3.5.3 直接型系统 …… 107
3.5.4 间接型系统 …… 107
3.5.5 热虹吸系统 …… 108
3.5.6 直接型系统的设计 …… 110
3.5.7 主动式间接加热热水系统 …… 110
3.5.8 选择合适的系统 …… 114
3.6 集热器大小 …… 117
3.7 可能存在的风险 …… 122
3.8 水泵和控制器 …… 123
3.9 太阳能热水系统的安装 …… 125
3.9.1 集热器的装配 …… 125
3.9.2 设备维护 …… 126
3.9.3 系统的预期效果 …… 126

3.10　水暖气暖双系统 …… 127
3.11　太阳能电热收集系统 …… 128
3.12　涓流式太阳能集热器 …… 128
3.13　太阳能泳池加热系统 …… 130
3.14　太阳能制冷 …… 131
3.15　未来展望 …… 137

第4章　太阳能供暖系统 …… 139

4.1　太阳能供暖的要求 …… 139
4.2　小型或家用太阳能供暖系统 …… 140
4.2.1　空气导热系统 …… 140
4.2.2　水导热系统 …… 145
4.2.3　案例分析：约翰·凯尼文（John Canivan）系统 …… 147
4.2.4　案例分析：美国威斯康星州的一个被动式与主动式太阳能房 …… 149
4.2.5　工业规模的太阳能供暖 …… 150
4.2.6　生产用热 …… 152
4.3　区域太阳能供暖 …… 153
4.3.1　案例分析：菲德烈斯哈芬市（Friedrichshafen）的区域供暖系统 …… 155
4.3.2　案例分析：德瑞克·兰丁太阳能社区 …… 156
4.3.3　太阳能热电联产供暖与制冷系统 …… 160

第5章　太阳热能的拓展应用 …… 161

5.1　海水淡化和污水净化 …… 161

5.2 水冷温室 …… 163
5.3 太阳能干燥器 …… 166
5.3.1 基本结构 …… 167
5.3.2 帐篷式太阳能干燥器 …… 167
5.3.3 支架式太阳能干燥器 …… 168
5.3.4 间接式太阳能干燥器 …… 168
5.3.5 太阳能干燥炉 …… 169
5.4 太阳能巴氏灭菌器 …… 169
5.5 太阳能灶 …… 172
5.5.1 设计和原理 …… 173
5.5.2 太阳能灶的应用 …… 173
5.5.3 热箱 …… 175
5.5.4 制造商 …… 176

第6章 光伏发电 …… 181

6.1 光伏发电的简介 …… 181
6.1.1 光伏发电的简要历史 …… 182
6.1.2 太阳能电池的工作原理 …… 183
6.2 光伏发电的应用 …… 192
6.2.1 并网发电系统 …… 192
6.2.2 建筑一体化光伏发电和光伏建筑 …… 210
6.3 成本效益 …… 215
6.3.1 温带地区 …… 215
6.3.2 炎热或日照充足的国家 …… 218
6.3.3 电网同价 …… 221
6.3.4 容量可信度 …… 222

6.4　光伏电站 …… 223
6.4.1　追日跟踪系统 …… 224
6.4.2　现有光伏电站所处的位置 …… 226
6.4.3　聚光光伏发电 …… 226
6.4.4　光伏发电的价格 …… 230
6.5　光伏发电的前景 …… 230
6.6　光伏发电对环境的影响 …… 239
6.6.1　能源回收期 …… 239
6.6.2　全球气候变暖的影响 …… 240
6.6.3　加工和处理过程的污染 …… 241
6.7　新的光伏发电技术 …… 242
6.7.1　染料敏化太阳能电池 …… 242
6.7.2　纤维基太阳能电池组件 …… 243
6.7.3　具有加热和制冷能力的层压光伏板 …… 243
6.7.4　纳米技术和电池印刷技术 …… 244
参考文献 …… 244

第 7 章　独立光伏发电 …… 245

7.1　离网光伏系统 …… 245
7.1.1　便携设备 …… 247
7.1.2　街道设施 …… 249
7.1.3　供水装置 …… 251
7.1.4　制冷 …… 255
7.1.5　家用系统 …… 256
7.2　基本的系统设计 …… 256
7.2.1　评估选址 …… 259

7.2.2 减少用电需求 …… 259
7.3 蓄电池 …… 259
7.3.1 充电控制器 …… 261
7.3.2 维护 …… 261
7.4 交流系统 …… 261
7.5 混合系统 …… 263
7.6 小型电网 …… 264
7.7 未来展望 …… 265

第8章 聚光太阳能热发电 …… 266

8.1 发展历史 …… 267
8.2 工作原理 …… 273
8.2.1 抛物面槽式系统 …… 276
8.2.2 线性菲涅尔反射镜（LFR） …… 278
8.2.3 中央集热器或塔式系统 …… 280
8.2.4 抛物面碟式系统 …… 282
8.3 环境效益和影响 …… 283
8.4 CSP 适用地区 …… 284
8.4.1 最近正在进行的项目 …… 285
8.4.2 经济效益 …… 286
8.5 发展前景 …… 287
8.6 太阳能塔 …… 289
8.7 温差发电 …… 290

第9章 总结 …… 293

9.1 氢能经济 …… 297

9.2　脱离对化石燃料的依赖 …… 299

第 10 章　太阳能相关信息资源 …… 301

10.1　可用能源量 …… 301
10.1.1　MESoR …… 302
10.1.2　HelioClim-3 …… 303
10.1.3　PVGIS 和 PVWatts …… 303
10.1.4　NASA 上关于地表气象和太阳能的数据库 …… 307
10.1.5　METEONORM …… 308
10.1.6　TRY …… 309
10.1.7　度日（degree days） …… 309
10.2　其他网络资源 …… 312
10.2.1　范例研究和技术信息 …… 312
10.2.2　实时光伏发电系统案例 …… 312
10.3　印刷资源 …… 313
10.3.1　图书 …… 313
10.3.2　杂志 …… 313
10.4　仿真工具 …… 313
10.4.1　bSol …… 314
10.4.2　DAYSIM …… 314
10.4.3　EnergyPlus …… 315
10.4.4　DASTPVPS …… 315
10.4.5　DesignBuilder …… 316
10.4.6　Design Performance Viewer …… 316
10.4.7　Ecotect …… 317
10.4.8　Energy Design Guide Ⅱ …… 317

10.4.9 ENERGIEplaner …… 317
10.4.10 ENERGY-10 …… 318
10.4.11 eQUEST …… 318
10.4.12 Green Building Studio …… 319
10.4.13 IDA ICE …… 320
10.4.14 Virtual Environment …… 321
10.4.15 PHPP …… 321
10.4.16 Polysun …… 322
10.4.17 PVsyst …… 323
10.4.18 PV * SOL …… 323
10.4.19 Radiance …… 324
10.4.20 RETScreen …… 324
10.4.21 T * Sol …… 325
10.4.22 THERM …… 326
10.4.23 VisualDOE …… 327
10.5 建筑物设计与实际建设中的细节 …… 327
10.6 太阳能热效应 …… 328
10.7 利用太阳能进行烹饪 …… 328

第1章

引　言

“虽然近代的书籍并没有提及将太阳（见图1.1）热能应用于机械作业的事，但人们决不要认为它是近期的想法。恰恰相反，人们应该认识到这种想法由来已久，而且它在几个世纪内缓慢的发展过程中孕育了各种新奇的设备。”奥古斯丁·伯纳德·摩夏在1878年的法国巴黎世界博览会上展示了一个太阳能动力造冰设备之后如是说。

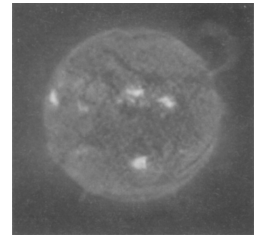


图1.1　太阳
（资料来源：维基共享资源）

1880年，奥古斯丁·伯纳德·摩夏展示了其发明的一个太阳热能工业产品时说：“欧洲工业总有一天会再也找不到资源来承载它巨大的扩张……煤毫无疑问将会被耗光。这个时候工业该何去何从呢?”

奥古斯丁·摩夏在150年前发明了第一台太阳能发动机，是太阳能领域非凡的先驱（见图1.2和图1.3）。从那以后特别是最近50年人们开发利用太阳能的技术得到长足的发展。如今，随着环境的不断恶化，几乎每个星期都会诞生一种新的方法，以利用每天照射在地球上的巨量太阳能。

图1.2　法国太阳能先驱，奥古斯丁·摩夏（1825—1912）

从撒哈拉北部即将为欧洲提供能源的大型太阳能发电站到不需要供热或供冷的房屋（被动式建筑）；从iPhone太阳能充电外壳或充电器到即使在夜里也可以让阳光

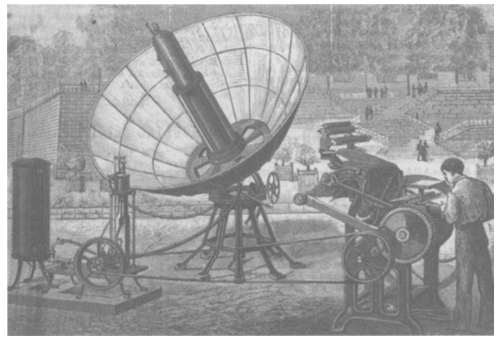


图 1.3　1882 年 8 月 6 日，奥古斯丁·摩夏于巴黎杜乐丽花园建造的报纸打印机，该打印机利用太阳热能技术，每小时可以打印 500 份（资料来源：考比斯图片公司）

为我们的房屋提供能源的相变材料式太阳能电站；从一辆顶部装有太阳能电池板的电动汽车，到一件太阳能滑雪衫。越来越多类似的创新逐渐进入到我们的视野中。这些新产品就像初升的太阳，让那些为能源即将消耗殆尽而担忧的人们看到了一丝希望的曙光。只要太阳能可以代替污染严重的化工能源和安全风险极高的核能就足以让人欢呼雀跃了，这两种能源给环境带来了巨大的危害，相反，太阳能无处不在、无污染、取之不竭、用之不尽，并且是免费的。

即使未来人口不断增加，地球每天接收到的太阳能也足以应对全球范围内所有的能源需求。我们可以像罗马人那样尝试着用太阳能而不是电能为建筑供热或者供冷；可以利用太阳能集热器收集热能来加热水；可以通过太阳能电池板收集光能产生电力；甚至可以模拟大自然植物生长的方法，利用光能进行光合作用，提供我们日常的食物需求。本书介绍了太阳能研究的一些现状和机遇，这些可以帮助我们免受气候恶化的威胁。还介绍了两种太阳能利用技术，即用于加热水的热能利用技术和用于产生电能的光能利用技术。另外，本书简单地介绍了世界各地各种太阳能应用现状和趋势。与其

他技术类书籍一样，本书也涉及一些需要谨记的基本技术术语。

每一章都有一个小节介绍每一种技术的发展历程，在此过程中产生了许多令人印象深刻的趣事或现象。例如，一个有趣的现象是法国人在太阳能发展中的重要作用——从拉瓦锡、奥古斯丁·摩夏、亚伯·皮福瑞、菲列克斯·特洛姆一直到新型的太阳能飞机和飞艇的发明者。更有趣的是，虽然太阳能技术在过去的三个世纪里快速发展，但是也曾经因为煤炭或石油的竞争而被多次抛弃。1914年聚光式太阳能发电站以及20世纪30年代美国的太阳能热水器仅是其中的两个例子。在当时的情况下，太阳能几乎就要成为世界最重要的能源了，如果廉价石油储量没有被大量勘探和开采出来，如今太阳能应该会更加普及。200多年以来，地壳中丰富的化石燃料推动着人类的发展，但是同时也带来了气候变化的危机。试想若地球上的化石燃料没有那么多：假设它们在1914年就已经耗尽——我们现在可能已经进入太阳能时代了。再假设它们在20世纪70年代就已经消耗殆尽——我们现在就不用争论气候变化是否由人类活动引发的这个问题了。不管太阳能时代最终是在21世纪未来10年或者更久远些才会到来，但毫无疑问的是它一定会到来。对于前面提及的太阳能先驱者而言，继承者终将因没有及时重视太阳能的发展而欠下重债。

1.1 技术范围

可获得的太阳能能量远远超过现有技术可获得的能量，在很大程度上，其原因在于太阳能不是特别集中。为了收集足够的太阳能进而转换成满足人类需求的电能，可能需要占用相当大的地表面积。事实上，加利福尼亚大学物理系的马蒂亚斯·罗斯特已经算出来它将占用1000000km^2（386102mile）的陆地面积，理论上该面积可由以下六个区域提供：撒哈拉沙漠、澳大利亚大沙漠、中国塔克拉玛干沙漠、伊拉克/科威特、美国南部阿他加马沙漠、美国大盆地（见图1.4）。以现有的技术水平，在这些区域全部安装上太阳

能发电设备总共可发电 18TWe，可以满足 2006 年全球主要的能源需求，计算过程中假设太阳能面板将太阳光转化为电能的效率为 8%。其中的一个项目即撒哈拉太阳能发电项目已经在进行中，该项目可以为欧洲提供电能，但是，该项目使用的是集光太阳能热发电技术而非光伏发电技术，该技术收集太阳能热能驱动蒸汽机发电。

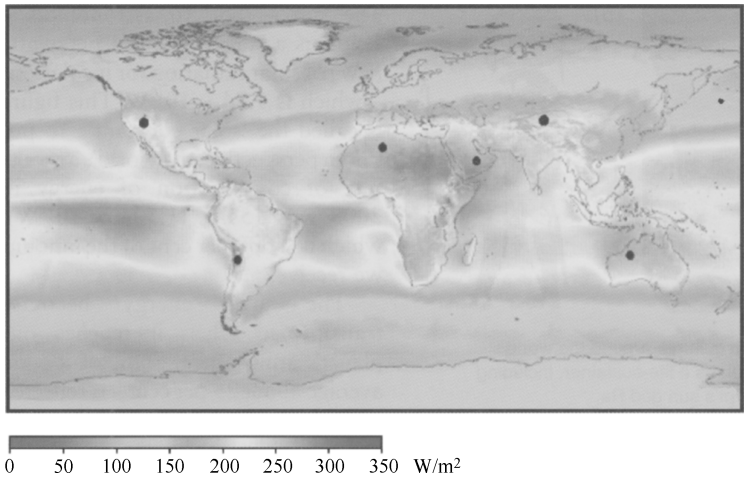


图 1.4　计算结果表明，仅在世界最炎热的 6 个地区（黑点所示）建造太阳能发电站就能满足全球的能源需求：18TWe。图中颜色代表年平均到达地球表面的太阳能辐射总量，单位为 W/m^2，如地图下面标尺所示（资料来源：www. ez2c. de/ml/solar_land_area © Matthias Loster）

太阳能光伏技术只是众多太阳能技术中的一种。本书将详细介绍以下技术：

1）被动式太阳能建筑。

2）太阳能热水器。

3）太阳能热发电。

4）光伏发电。

为简单起见，我们仅部分而不是详细无遗地罗列出这些技术的终端应用，如下所示：

1）太阳能采暖和制冷：被动式太阳能设计，城市规划，被动风道通风，相变材料，无光渗透型集热器，太阳能冷却器和制冷器。

2）照明：上光，特殊玻璃涂层；太阳导光管。

3）热水系统：太阳能热水系统；真空管；游泳池供热；主动式太阳能供冷；大型建筑物和大区域的应用。

4）烹饪，食品烘干，海水淡化以及水处理。

5）供电：光伏组件，系统设计，过程热，聚光式太阳能热发电。

6）运输：太阳能汽车，太阳能制氢。

1.2 太阳辐射和地球

人类文化将太阳神视为万神之首，这是世间一切皆始于太阳的基本事实的反映（见图1.5），地球上生物赖以生存的几乎所有能量均来源于这个距其1.5亿千米远的大火球。太阳，天文学家称为“Sol”，辐射到地球的能量达到惊人的174PW即1.74×10^{17} W，该

(a) (b)

图1.5 世界上许多古老的传统文化包括希腊的阿波罗（a）和古埃及的太阳神（b）都认为太阳是万物之源（资料来源：维基共享资源）

值称为太阳常数。作为比较，2008 年世界平均消耗能源量为 15TW（1.504×10^{13}W），只相当于太阳辐射到地球能量的 0.008%。

太阳辐射能到达大气层时会产生变化，29% 的能量被云层反射回太空，23% 的能量在辐射到地球表面过程中被大气层吸收掉，只有不足一半的能量辐射到地球表面（见图 1.6）。因此尽管人造卫星测量到的即将进入大气层的太阳能量为 1366W/m^2（这个常数称为太阳总辐射能），实际上，平均只有 340W/m^2 的能量到达地球表面。

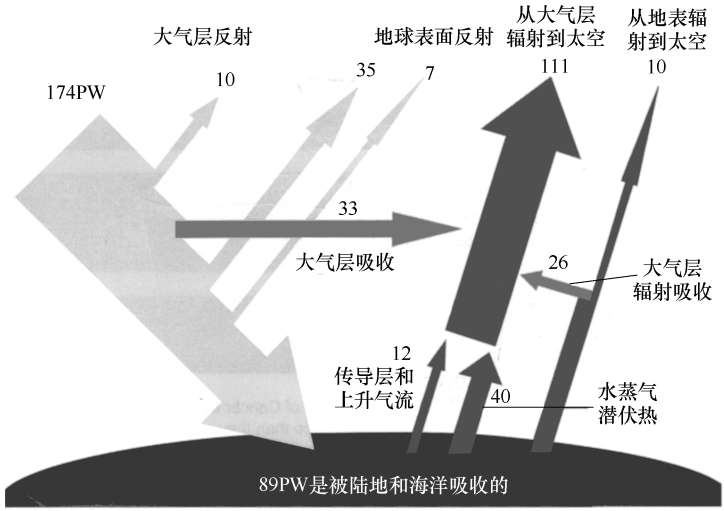


图 1.6　地球能量平衡图。进入地球的太阳能被地球生态系统不同部分所吸收，但是大部分是被反射回外太空的，否则地球将会过热（资料来源：维基共享资源）

即使这样，地球表面实际可利用的太阳能比该平均值（总能量的 1/4）还要低，因为地球上大部分的表面和太阳光线是不垂直的，在此情况下，这些能量就会扩散到更大的区域内。由于地球自转面与地球公转平面之间有 23.5° 的倾斜角，只有在夏季正午时分——也称为太阳正午（并不总是和当地正午时间相同）的区域接收到的太阳能量才是最高的。

专栏 1.1 单 位

kilo- 千 k 10^3 1000

mega- 兆 M 10^6 1000000

giga- 吉 G 10^9 1000000000

tera- 太 T 10^{12} 1000000000000

peta- 拍 P 10^{15} 1000000000000000

例子：

1 毫瓦（mW）=1/1000 瓦（W）

1 千瓦（kW）=1000 瓦（W）

1 兆瓦（MW）=1000000 瓦（W）

1 吉兆（GW）=1000000000 瓦（W）

1 太瓦（TW）=1000000000000 瓦（W）。2006 年全世界用了大约 16TW 的能量

PW：拍瓦，到达地球的太阳能有 174PW。

专栏 1.2 功率和能量

功率是产生或者消耗能量的速率。单位是瓦特（W）。1000W = 1kW。

能量是一段时间内产生或者消耗的功率。单位是瓦特 × 小时（Wh）。1000Wh = 1kWh，常用作电费的计量单位。

单位也可以是焦耳（J），Wh 可以用来表示热能也可以用来表示电能，但是 J 是用来表示热能。3600J = 1Wh。

换言之，1J = 1Ws，因为 1h = 3600s；或者说 3.6MJ = 1kWh。

例如：

一块功率为80W的太阳能光伏电池板2h发电量和两块功率为80W太阳能电池板1h的发电量都是2×80=160（Wh）。

三块功率为90W的太阳能电池板5h发电量为3×90×5=1350（Wh）=1.35（kWh）。

北回归线是太阳可以直射到的最北的位置，位于赤道以北23°26′17″的纬线上，在该位置上，太阳到达其天顶时与水平面的夹角为90°。每年的6月21日，北半球与太阳的倾角最大，此时南半球是冬季，北半球是夏季（见图1.7）。南回归线是赤道以南23°26′17″的那条纬线，每年12月21日正午，太阳直射在这个位置，此时北半球进入冬季而南半球则是夏季。地球一年绕太阳公转一周，在此过程中，太阳照射从地球的最北端移动到最南端，并且

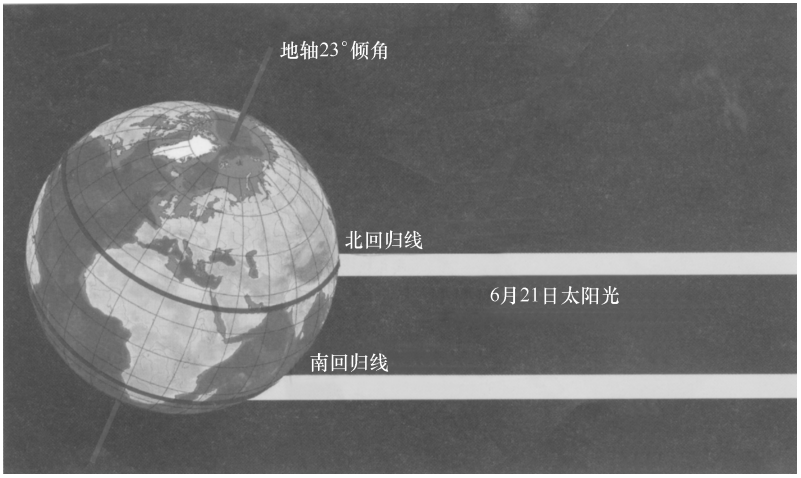


图1.7　6月21日中午时分太阳位于北回归线的正上方，因此太阳光线照射到北回归线的地表区域比照射到南回归线地表区域要狭小（冬至时候正好相反）。6个月后地球运动到太阳的另一面，情况正好相反

两次经过赤道，分别是 3 月 21 日和 9 月 21 日，对应的节气分别称为春分和秋分（见图 1.8）。

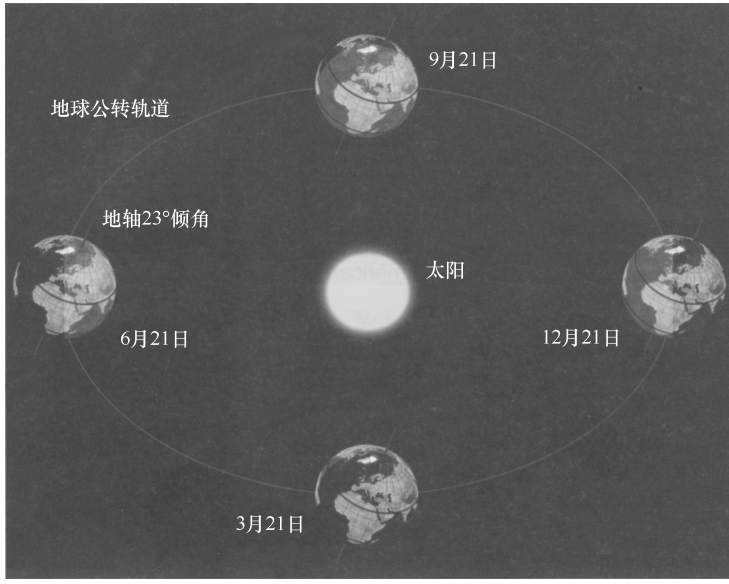


图 1.8　地球绕太阳公转，地轴 23°倾角引起季节的更替，改变太阳入射到地表的角度从而改变单位面积内接收到的太阳能量

因此太阳光辐射到地球的能量随纬度以及一天内时间的不同而变化。如图 1.9 所示，同样的光线，与地平线呈 30°角照射时的照射面积是垂直照射时的 2 倍，此时似乎可以预计单位面积上接收到的能量减少了一半，但实际上接收到的能量比一半还更少，因为前者相当于要穿越 2 倍厚的大气层，所以被吸收的能量更多。

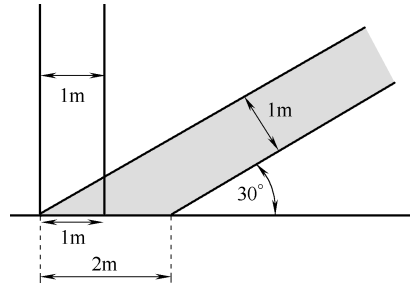


图 1.9　入射角影响水平面上接收的太阳能辐射量的原理示意图

专栏 1.3　太阳辐照度

太阳辐照度是单位时间内到达地球表面单位面积上的辐射能量，单位为瓦特/平方米（W/m^2）。太阳辐射能也称为太阳辐照，表示单位时间内的太阳辐照量。如果时间是1h（$W/m^2/h$），那太阳辐照度就和太阳辐射能是一样的。

正是由于这个原因，世界能源理事会认为美国宇航局计算得到的地球表面太阳能量值中只有一半是可用的，并且该值随地域不同而不同，如红海地区最大，为 $300W/m^2$，澳大利亚是 $200W/m^2$，美国为 $185W/m^2$，英国则只有 $105W/m^2$（见图1.10）。因此可以利用的太阳能总量取决于你所在的区域位置。

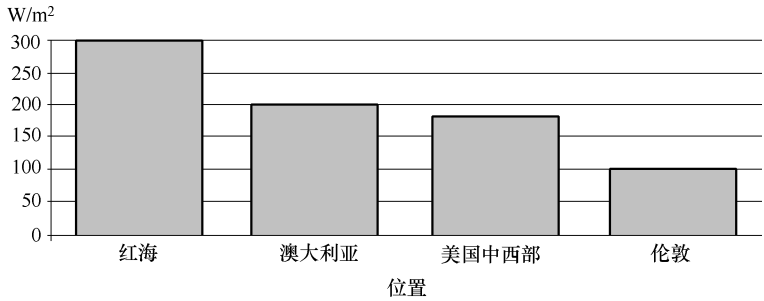


图1.10　不同地区的平均太阳辐射，单位是瓦特/平方米（W/m^2）。例如，美国中西部平均的可用太阳辐射大约是 $180W/m^2$。太阳辐射强度在每年的不同时候及每天的不同时刻都不一样

温室效应以及全球变暖

若不是大气层反射和吸收部分太阳能辐射热量，那么地球将会因温度过高而不再适合生存。幸运的是，能量进入与逃逸出地球的速率大致相等，这就是所谓的“辐射平衡”，这也意味着全球平均温度相对稳定，从而生命得以欣欣向荣。保持辐射平衡的功臣是那

些位于大气层顶层的一些气体（也就是温室气体）吸收红外波段的辐射热，从而阻挡地球上的热量逃逸到大气层之外。温室气体包括二氧化碳（CO_2）、水蒸气、甲烷以及臭氧。这些气体处于大气层的顶端，形成类似毯子状的保护层包囊着地球，其作用类似于温室中的玻璃外罩。

专栏 1.4　太阳光谱

到达地球表面的太阳电磁辐射频谱称为太阳光谱（见图 1.11），波长范围为 100 ~ 10^6nm，大部分位于可见光和近红外线范围内，小部分分布在紫外线范围。

光伏发电技术利用可见光产生电能，太阳能热利用产品（太阳能热水器）和被动式建筑设计（可供暖供冷的空间）则

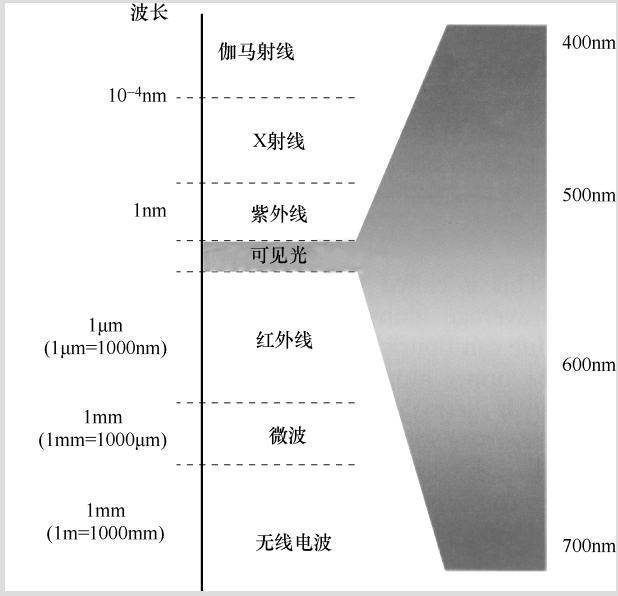


图 1.11　太阳光谱

（资料来源：维基共享资源）

利用太阳红外线波段。按照频率可将太阳光谱分为以下几类：

1）短波紫外线（UVC）：100～280nm。人眼无法观察到。

2）中波紫外线（UVB）：280～315nm。可引起光化学反应产生臭氧层。

3）长波紫外线（UVA）：315～400nm。可使皮肤晒黑，能用来治疗牛皮癣。

4）可见光：400～700nm。光伏电池即利用可见光来发电。

5）红外线：700～10^6nm（1mm）。太阳能热技术和建筑可吸收红外线产生热能。

现在，绝大部分的科学家都认可人类燃烧化石燃料导致了大气层最上层的这些温室气体的密度增大的观点。温室气体密度的增大使保留在地球生态系统中的热量比逃逸出地球的热量要稍微多一些，这就是众所周知的全球变暖，它会引起气候发生变化，科学家们都同意这将在全球范围内产生越来越多的、不可预测的极端天气事件（见图 1.12）。随着近年来全球平均温度以历史上前所未有的速度上升，气候平衡已被打破，这种情况已经悄然上演了。

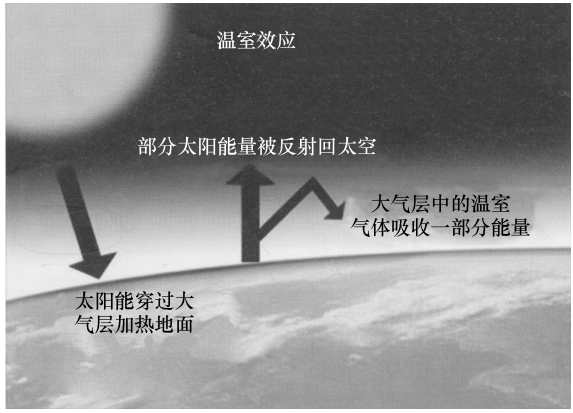


图 1.12　温室效应（资料来源：维基共享资源）

燃烧化石燃料为什么会影响气候平衡呢？植物依赖光合作用生长，在此过程中，植物利用太阳光将大气中的 CO_2 转化为有机物储存于植物体中并释放出氧气供人类呼吸。

化石燃料（石油、天然气和煤炭）是由数百万年前利用同样的过程捕获二氧化碳的植物演变而来的。这些植物被掩埋在地底下，然后变成煤炭或者石油，若掩埋在岩层之间则可能形成天然气。泥炭（也可作为燃料）同样含有古老的植物性物质，但是它形成的时间更迟些。这些燃料从地下被开采出来燃烧，它所含有的碳就会被释放到大气层中，从而改变了辐射平衡（见图1.13）。

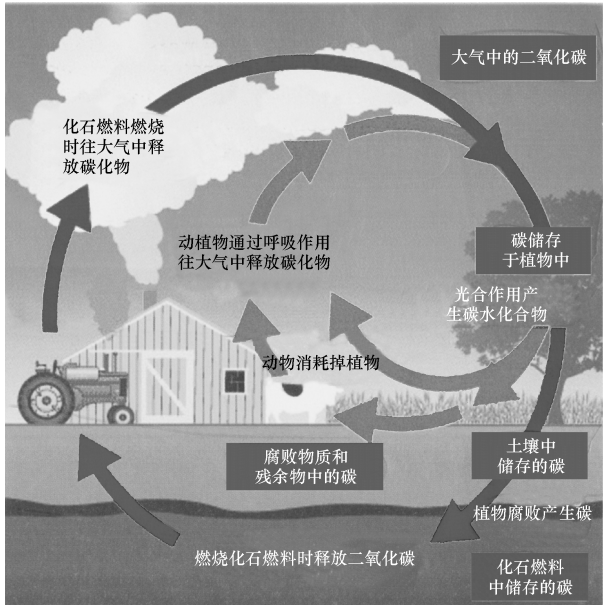


图1.13 碳循环和全球变暖（资料来源：Heather McKee，National Center for Appropriate Technology）

庆幸的是，我们可以通过栽种更多的植物以及利用合成木材来建筑房屋消耗大气层的 CO_2（见图1.14）。全世界都对太阳能

感兴趣的一个重要原因就是它可以替代化石燃料，这样可以减少温室气体的排放，从而有助于防止全球气候变暖以及灾难性的气候变化。

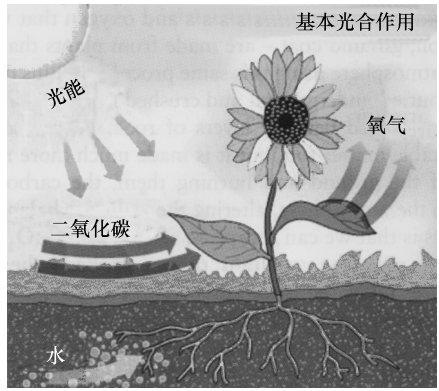


图 1.14　光合作用的基本流程
（资料来源：Science Doubts）

1.3　间接太阳能

到达地球的太阳能中很少的一部分（约为 0.002%）会被转化为可再生的风能和潮汐能，其形成的原因在于地轴的倾斜（参见 1.2 节），这也导致了我们所看到的季节的更替；先是一个半球得到的太阳能以及日照时间比另一个半球更多，接着另一个半球获得更多的太阳能和日照，如此交替。两个半球间存在巨大温度差从而产生了风和洋流。水分的蒸发和凝结、大气的对流和压力差、地球表面的热辐射等也是产生风和洋流的因素之一。我们可以通过风力发电机和潮汐发电机来利用这些巨大的能量。风力形成并驱动着海浪，我们可以利用潮汐发电机来收集这些能量。

稍多一部分的太阳能是通过光合作用进入植物或者其他生物体内，通过燃烧或者无氧堆制这些物质可获得热量和电能。如果通过

再种植来补充被消耗的植物，那么这也是一种可持续的、可再生的能源利用方式，其总的碳排放几乎为零。

地理位置

根据纬度、海拔高度以及其他一些气候影响因素，地球被划分为几个气候区（见图 1.15）。这些地区接收的太阳辐照量、云量和热量各不相同，这就决定了不同地区需要采用与之相适应的不同的太阳能技术和太阳能建筑设计。接下来要讨论到的太阳能应用技术的适用范围与之密切相关，主要的气候类型分别为：

1）干热气候（见图 1.16）。

2）热带气候（见图 1.17）。

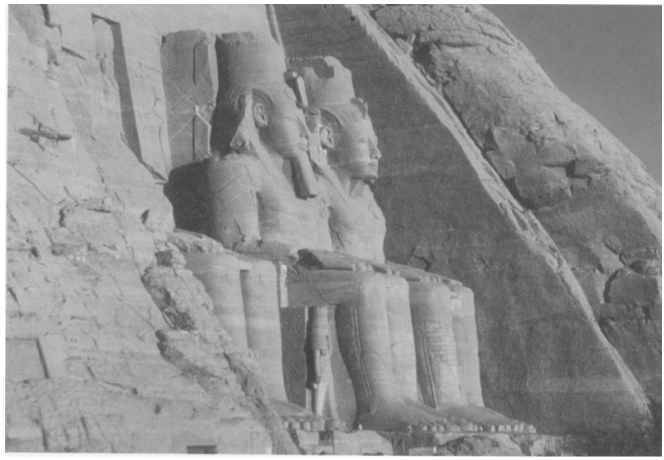
3）地中海气候（见图 1.18）。

4）温带气候（见图 1.19）。

5）高山气候（见图 1.20）。

6）极地气候（见图 1.21）。

图 1.15　世界主要气候带（资料来源：UK Meteorological Office）



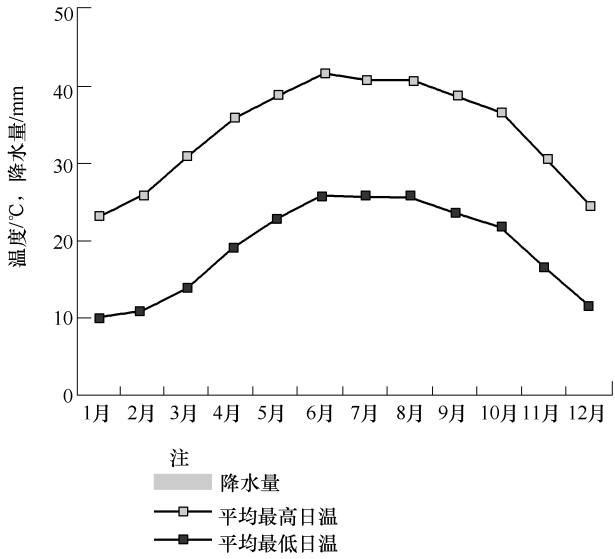


图 1.16　降水量少，干热，阳光充足；太阳当空照
（资料来源：UK Meteorological Office）

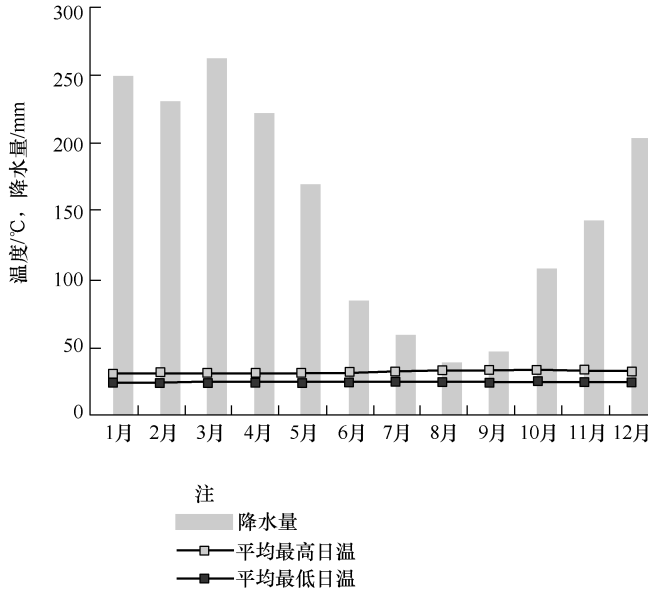


图 1.17　全年炎热，潮湿。太阳当空照
（资料来源：UK Meteorological Office）

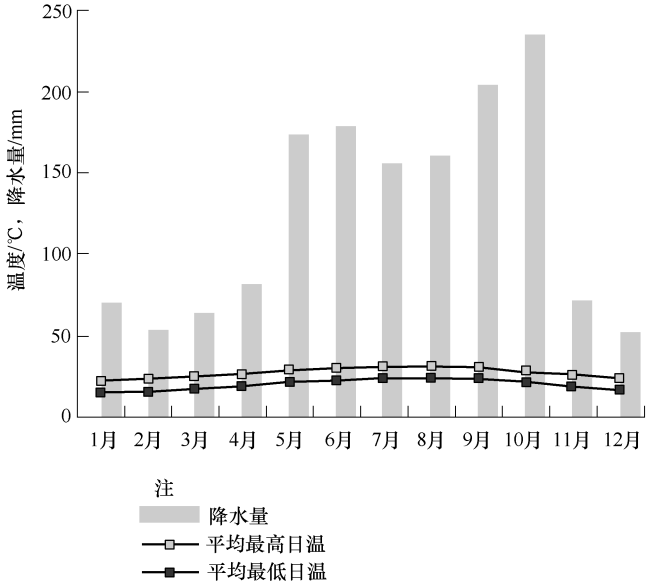
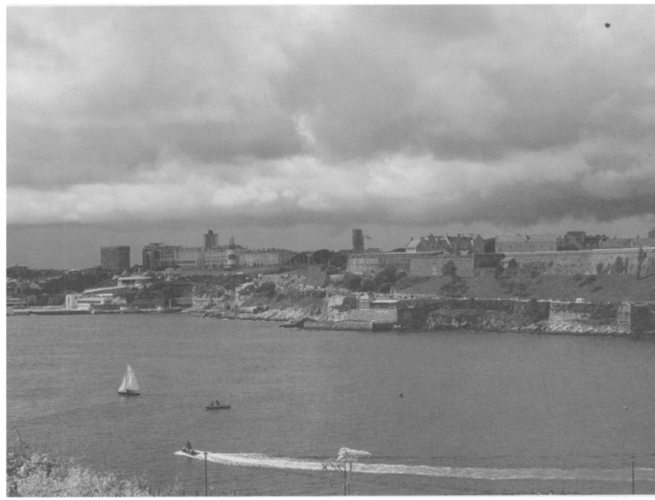


图 1.18　冬季阳光和煦，温暖；夏季很暖和，有雷暴雨。夏季太阳高挂在天空，冬季则不然（资料来源：UK Meteorological Office）



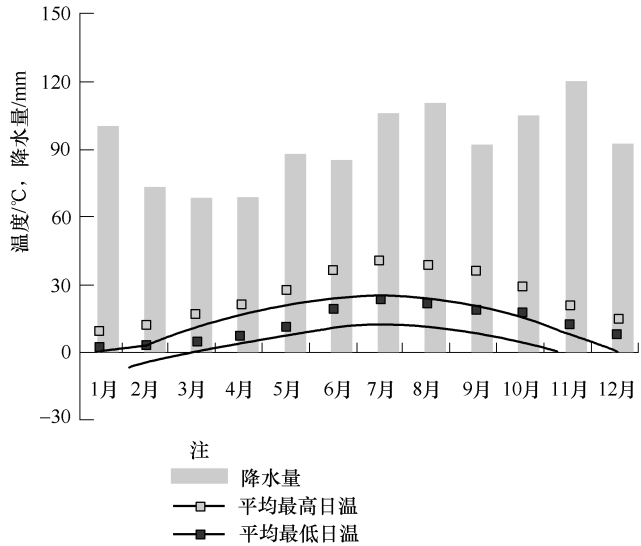


图 1.19　夏季暖和，冬季凉爽，多雨，天气无常多变。夏季太阳高高挂在空中，冬季则不然（资料来源：UK Meteorological Office）
注意：温带是位于热带和南北极之间，中纬度 23°26′22″N 和 66°33′39″N 之间或 23°26′22″S 和 66°33′39″S 之间。

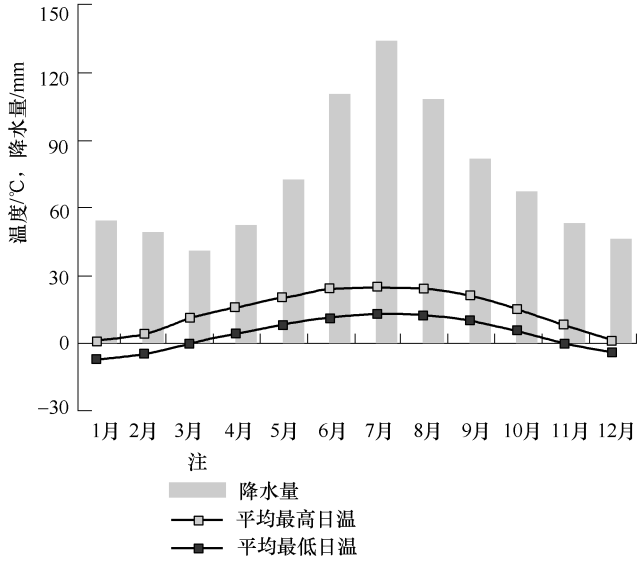


图 1.20　冬季寒冷低温，多雪晴朗，夏季多云潮湿。太阳的高度取决于纬度（资料来源：UK Meteorological Office）

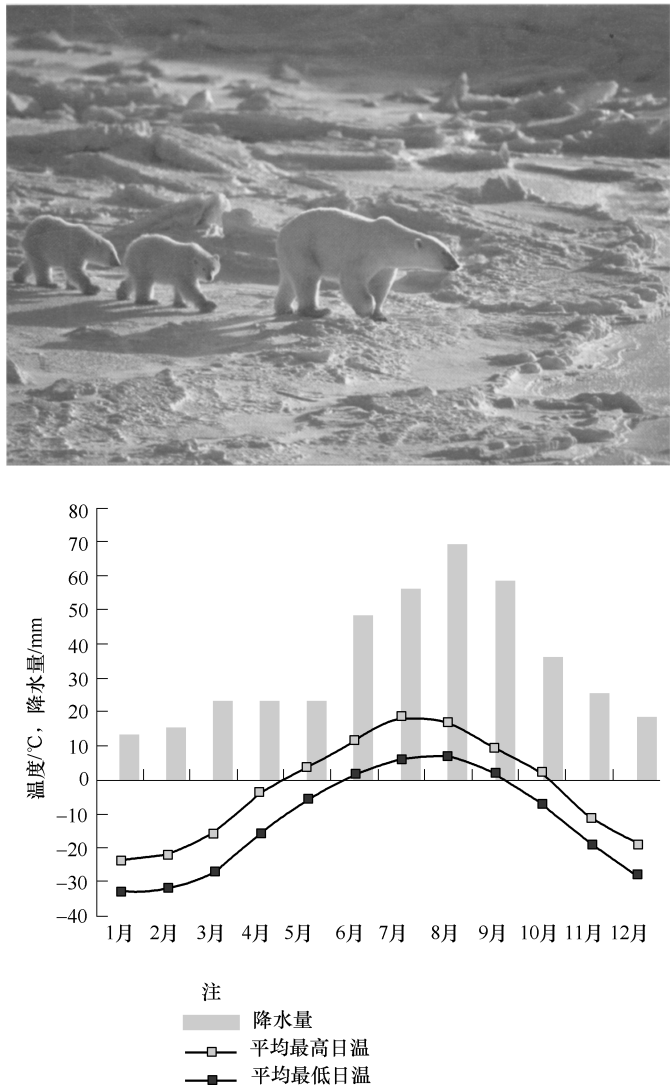


图 1.21　漫长的冬季长年积冰雪，温度很低，夏天短暂。太阳很低，冬季时甚至消失（资料来源：UK Meteorological Office）

1.4 直接辐射和散射辐射

影响某一地区太阳能利用率的另一个因素是其直射辐射量而不是散射量的大小。当太阳没有被云层遮挡时，直射阳光（有时也称为直接辐射）是太阳辐射中利用率最高的辐射形式，特别是用来供热时（红外线辐射）。但是太阳光也会被大气层里的颗粒所散射，这就是所谓的散射辐射，它也可以用于照明和小型的光伏发电。平均而言，北欧地区一年里接收到的总太阳辐射里有一半是直接辐射，另一半是散射辐射（见图 1.22）。“太阳辐照（insolation）”这个名词可以用来描述直接辐射、散射辐射以及以任意角度辐射到地表的总太阳辐射。

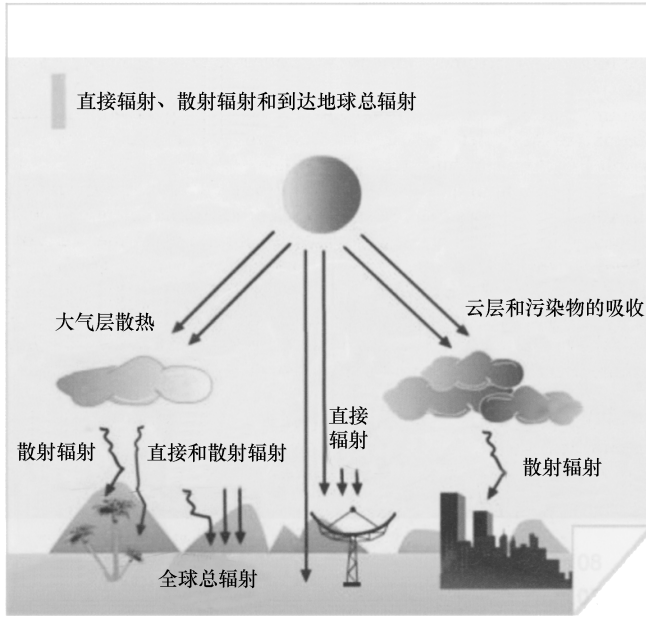


图 1.22　晴天太阳直接辐射，经过云层、污染物和水蒸气过滤和反射后的散射辐射

可利用的太阳辐射总量的估算

详细讨论特定地区、特定项目的可利用太阳辐射总量的计算方法已超出本书的范围。本系列丛书的其他书籍里提供了用于离网型和并网型光伏发电系统及中小规模太阳能热水系统的相关数据；本书的第 10 章列举了相关的资源网站，在这些网站里可以找到详细的日照分布图（见图 1. 23），这些官方数据是经多年的认真测量得到的，利用这些数据，可以对全世界范围内某一特定地区的太阳辐射量进行相关的计算。

图 1. 23　用以测量太阳辐射的电子辐照计

下述的仪器设备长期以来用于收集数据，或者用于测定某些抗太阳辐射系统的性能参数。开发者可以利用日射强度计（用来测量太阳全辐射量）、直接日射表（只测量太阳的直接辐射量）或者坎贝尔-斯托克司日照计（只测量太阳的红外辐射时间）进行实地测量，为保证测量的精度，日射表的传感器测量的角度必须与安装的光伏组件或者集光器的倾斜角一致。散射辐射可以分为各向同性部分分量（来自于整个天空）和环日辐射分量（太阳周围一个非常狭窄的环形区域）以及水平辐射分量。把这些测量数据代入函数中就可以计算出该地区的年太阳辐射总量。计算函数应考虑到其他的变量如方位角（即太阳所在的方位，指太阳光线在地平面上的投影与地平线正南方或正北方之间的夹角）、纬度、季节变化、气候、方向等。

第 10 章也介绍了一些可以根据太阳能系统、建筑材料和日照数据等技术参数进行计算的相关免费或付费软件。

1. 5　总结

第 4 章的集焦式太阳能热发电部分介绍了世界第一座太阳能热发电站，该电站成功运行，并且其建成运行的年份更令人惊讶：1913 年。不幸的是，第一次世界大战使世界陷入混乱之中，这个发电站

也被废弃了，石油是这次战争爆发的部分原因。所谓的强国之间为了争夺科威特附近新发现的油田而不惜兵戎相见，从那以后发生过多次类似的冲突，尤其是更近期发生的第一次和第二次伊拉克战争。如今，有关可再生能源的项目均被冠以“能源安全”的名义。但是，只有完全放弃使用石油和所有其他化石燃料作为能源来源，重新回归到利用每个地区适用的天然资源作为能源的分散式供应方式，才能给我们带来真正意义上的全球能源安全，才能避免因为争夺有限的资源而引发的战争。为什么我们还要再为是否采用丰富的天然资源（如阳光）等作为能源而争论不休呢？尤其是它还能避免我们对化石燃料日益强烈的依赖性所导致的其他灾害性后果：气候变化。

太阳能是一个真正快速发展的、激动人心的领域，本书的最后将简单介绍一些不同领域的新兴太阳能利用技术（例如图 1.24 所示）。在全球范围内，太阳能技术正以比其他任何能源更快的革新

图 1.24　美国亚利桑那州的碟式抛物面太阳热能装置，将 1000℃（1832℉）左右直射红外热能聚焦到斯特林发动机来发电（资料来源：Courtesy of Stirling Energy Systems，Arizona，US）

速度进行着。我们也必须这样做，因为全球对能源的需求正在快速增长。目前，仅有光伏发电的装机量的增长速率勉强与全球能源需要的增长速率持平，与其他太阳能应用技术一起，在接下来的 50 年内太阳能可以满足更大比例的能源需求，它将和其他可再生能源一起逐步取代化石燃料。只有当那些依赖化石燃料的技术像蒸汽机一样退出历史的舞台时，我们才能说我们已经生活在太阳能时代。

参 考 文 献

BP, June 2009, 'BP Statistical Review of World Energy 2009', bp.com/statisticalreview

Lindsey, Rebecca, 2009, 'Climate and Earth's Energy Budget', NASA, available at http://earthobservatory.nasa.gov/Features/EnergyBalance/

Loster, Matthias, 2006, 'Total Primary Energy Supply: Required Land Area', www.ez2c.de/ml/solar_land_area/

WEC, 2007, Survey of Energy Resources, www.worldenergy.org/publications/survey_of_energy_resources_2007/solar/720.asp

第2章

被动式太阳能建筑

被动式太阳能建筑设计是人们最早利用太阳能的方式。这种设计最大程度上直接使用太阳能（没有采用任何光伏面板或模组）来照明、取暖或制冷，以使房屋对外部能源的需要最小化，这意味着建筑的结构组件本身能够收集太阳能并进行有效的利用。相比之下，主动式太阳能系统需要使用外接设备如太阳能电池板、集光装置和储能装置，包括机械泵和风扇等。事实上，这两种太阳能应用方式的区别已经十分模糊，而且这两种方式经常结合使用。但是如果设计者熟知这两种方式的各自特点会有助于减少人造能源的消耗。

建筑内部对照射入室内的太阳光和热有一定的需求量，这种需求量随季节的不同而变化。被动式太阳能建筑（常称为低能耗建筑）可以根据户外气候条件主动控制室内的照明、空气质量、湿度和温度。建筑物内部的一些活动会产生热量，例如我们身体会散发热量，烹饪时会散发热量，使用热水时会散发热量，一些电器设备如打印机、计算机、冰箱等工作时也会散发热量。如果能够适当地利用这些热源，再加上太阳能本身，就可以满足室内环境的供暖需求，同时还需要少量的空气交换以保持室内空气新鲜。另外，通风和排气系统应能根据室外的天气条件自动控制以维持室内温度的舒适度。

专栏 2.1　设计高效的被动式太阳能建筑的要素（见图 2.1）

1）注重建筑的格局和朝向。

2）使用高性能的窗户/玻璃。

3）使用蓄热材料在日间吸收热量防止房间过热，并在晚间释放这些热量。

4）采用高效的隔热和密封设施。

5）采用可调的加热、冷却、排气和采光系统。

6）安装高能效的设备来补充太阳能无法满足的部分能源需求。

7）确保每个耗能设备的能效尽可能高，并选择适当的型号规格。

8）确保室内的设施和系统能够正常运行和维护。

9）为居住者提供培训以帮助他们更舒适地居住。

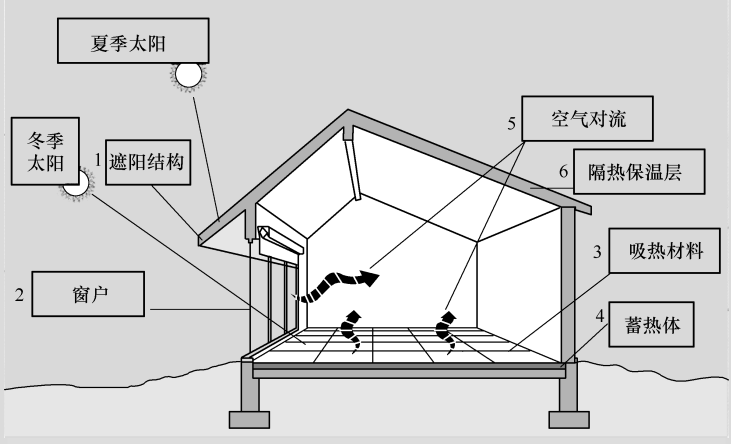


图 2.1　被动式太阳能建筑设计的六要素（资料来源：UK Crown Copyright）

2.1 五条基本原则

如何高效地利用太阳能，除了要根据建筑物的具体位置来具体确定，还有许多通用的重要准则。以下是五条基本准则：

1）采光窗户最好采用双层或三层玻璃，并涂上低辐射（Low-E）涂层，这种玻璃可以透射可见光但反射红外线。建筑窗户的大小和位置取决于其相对于阳光照射的位置。在采光和隔热两者之间要进行最优化平衡设计，使得室内有足够的亮度以尽量减少使用人工光源，同时室内还能保持舒适的温度而不会过热。并且这种平衡是可调节的，它应该能根据不同季节、不同气候条件，甚至每天的不同时段自动调整。总的来说，就是要使室内获取尽可能多的阳光照射。

2）日光一定要照射到室内吸热材料的表面以使热量传递到蓄热体中，因此，地毯或窗帘不要挡住吸热材料的表面（见图 2.2）。蓄热体的热质即储存的热量值为该材料热容与其总质量和热导率的乘积，材料的密度越大，其蓄热能力越强，如石头。这意味着白天这些材料蓄热从而有助于避免室内过热，夜间时储存的热量以很慢的速度释放出来，这可以使室内变得很暖和。材料的密度越大，其吸热和放热的速度就越慢。

3）窗外的遮阳设施可以避免夏日过多的高照阳光照射到室内，但冬季时又允许阳光能够照射进来。遮阳设施可以是天然的，如落叶植物，也可以使用手动或电动的遮阳板或百叶板。

4）热空气会上升，并在建筑物内产生空气对流，这有助于通风并可通过对流换热把热量从建筑物的一边传导到另一边，这一过程有时又称为“烟囱效应（stack effect）”。

5）隔热和防风可以使房间内产生一种热包围层。隔热产生热阻挡作用：当我们想凉快的时候，可以把热量挡在外面；当我们想暖和的时候，也可以把热量维持在室内而不扩散到室外。

人们对冷热的感受也是相对的，如冬天，在高纬度寒冷地区的地下室内会感觉比外面温暖，但是同样是这个地下室，在夏天进来

图 2.2　日光直接照射在蓄热体上。注意不要在地板和墙壁上附着多余的遮盖物，这会影响蓄热体对太阳能的吸收。这是一栋位于加拿大的主动式太阳能住宅，名为 Eco Terra™（资料来源：www. solarbuildings. ca/en/main_53）

会觉得比外面凉快。实际上，不同季节时地下室温度变化很小。由此我们得到了一个在炎热的地区保持室内凉爽的方法：尽可能不在朝向太阳的墙面上开设窗户，并且建造足够厚的外墙（至少使用隔热性良好的材料）。

相反地，即使天气寒冷，当太阳照耀的时候，坐在朝南的窗前

会感到温暖，因为窗户会挡住风和冷空气给人带来的寒冷的感觉。如果可以通过加热用高蓄热材料制造的地板和墙面，或者加热相变蓄热材料，如蜡，来收集这些照射进来的热量（通常表面颜色越深，吸收的热量越多），这样在没有阳光照射的时候，蓄热材料吸收的热量会慢慢地释放到室内。同时还可以在面对窗户的墙面上方建造一个通风口，这样可以利用烟囱效应使室内上部空间和较冷的区域也温暖起来（见图 2.3）。

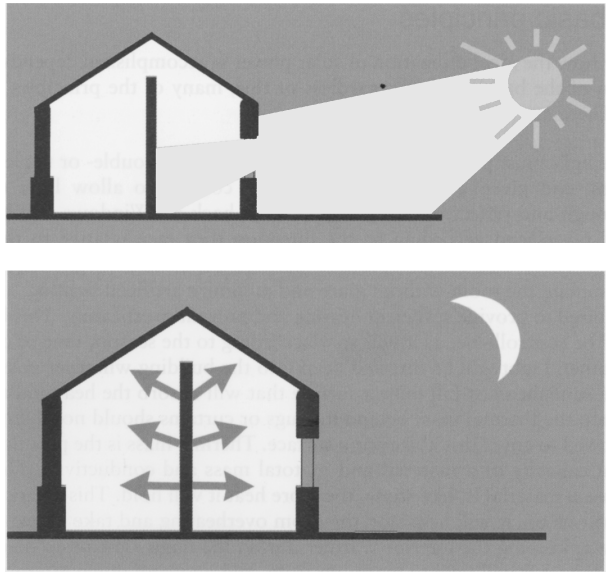


图 2.3　使阳光从朝阳的窗户照射进来，并照射在蓄热能力高的墙面或地板上（暖房也类似），这样白天房间内吸收的热量可以在晚间缓慢释放出来，保持室内温度

到此为止，我们对“被动式太阳能建筑”中的“被动”一词的含义应该更加清晰了。由于加热或制冷设备的投入的减少，高效节能建筑并不比普通的建筑花费更多，并且还具有其他方面的优点，如这些建筑的生活环境更健康、居住更舒适。另外，这些建筑在使用寿命期限内的运作成本也是非常低的。

2.2　房屋整体设计方案

设计被动式太阳能建筑时必须综合考虑建筑内所有设计元素及其位置，并将这些元素完整、动态地整合到一起。设计的理念是："设计应使房间尽量减少消耗能源，迫不得已时才使用外部能源"。另外，如果雇用那些没有能力进行综合设计的团队来设计，结果可能不尽如人意，例如空调系统的设计规格超出实际使用需求等。同样对于建筑物窗户的设计也有类似的问题，例如，若采用了透光特性不符合要求的玻璃、随意地设计遮阳或通风系统，这些问题都不利于建筑物整体的高效运转。当然，在一些简单的建筑物设计中，可能不需要专业的设计团队，而只需要请专业设计公司进行计算机软件建模并对建筑进行整体优化，优化后可使建筑物的日常能源消耗降低 60% ~75% 。如果居住者积极参加培训并仔细阅读使用手册，房屋运转的能源消耗可以轻松减少 80% 以上。

通过对整栋建筑物的性能和可变设计元素如建筑物朝向、窗口大小、飞檐等进行建模，并利用程序进行反复优化，最终可以得到囊括所有设计因素的最优化设计方案。设计时还应考虑建筑物从方案规划到最终拆除整个使用周期对环境产生的各种影响。首要的设计目标是满足居住者的生活需要，并尽量降低建筑物运作时消耗能源所带来的直接或间接的碳排放量。衡量的最佳标准是每减少一吨二氧化碳排放所需付出的成本。碳排放对环境的影响贯穿建筑物的整个使用周期，包括如下过程中消耗的能源：

1）对于建筑原材料而言，有时候称为"蕴能量（embodied energy）"。

2）翻新和维修建筑物。

3）房屋的运作和居住。

4）房屋拆除时。

2.2.1　对环境影响最小化

在建筑的全部使用周期中，碳化石类材料的"蕴能量"占总

能源消耗最高可达50%。房室建设时所使用的建筑材料在其加工过程中已经消耗了大量的能源，并且已经产生了对全球环境有害的温室气体等不良物质，这称为“蕴能量”。在房屋建成伊始，其环保节能特性还没有产生收益的情况下，只能说其具有潜在节能效果。换句话说，房屋的环保节能特性是在长期的使用过程中体现出来的，也许在房屋快要拆除的时候，节能总量与其所用建材所消耗的能源总量相持平。因此我们尽量选用天然材料如木材等，因为在房屋拆掉前，这些天然材料可以将碳“锁住”，不释放出去。

麻石灰（Hemp-lime）是一种由石灰和麻纤维混合成的改进混凝土，而石灰混凝土（Limecrete）是一种生石灰和混凝土的混合体或在石灰里混入天然矿物骨料所形成的材料。这两种材料都是低“蕴能量”物质，而纯混凝土则是一种高“蕴能量”物质。进一步说，制造混凝土对全球气候变暖有很大的影响，这是由混凝土的来源和加工工艺所决定的。相反地，麻石灰可以“锁住”部分碳基化合物，因为麻石灰里面的麻纤维在其生长期间吸收了大量的二氧化碳。使用混凝土会对环境带来很多不良影响，但麻石灰复合材料与其他一些可再生材料一样，对生态环境没有不良影响（如果麻石灰的来源没问题的话）。石灰混凝土和麻石灰复合材料与混凝土相比，结构强度较低，但是石灰混凝土和麻石灰复合材料使用寿命长、透气性好、柔韧性好（不容易碎裂），同时也是一种很好的蓄热体。这些可再生自然材料可以“锁住”碳元素，避免其排放到大气中产生污染，因此尽可能多地使用它们。

在隔热材料方面（见图2.4），纤维材料（如可回收报纸）、稻草、木材纤维和其他天然材料的“蕴能量”是最少的，性价比也很高。玻璃纤维或者石棉具有较高的“蕴能量”，但是比起发泡聚苯乙烯EPS、挤塑聚苯乙烯XPS、喷涂泡沫等泡沫绝缘材料少得多，因此天然材料临界能源回收期更短。巧合的是，大多数天然植物材料或金属更易于回收利用，很多材料能够降解和自然腐烂分解，或者可以再次利用。建筑材料要尽

量就地取材，一般而言，建筑材料的“蕴能量”随着其运输距离成比例增加。

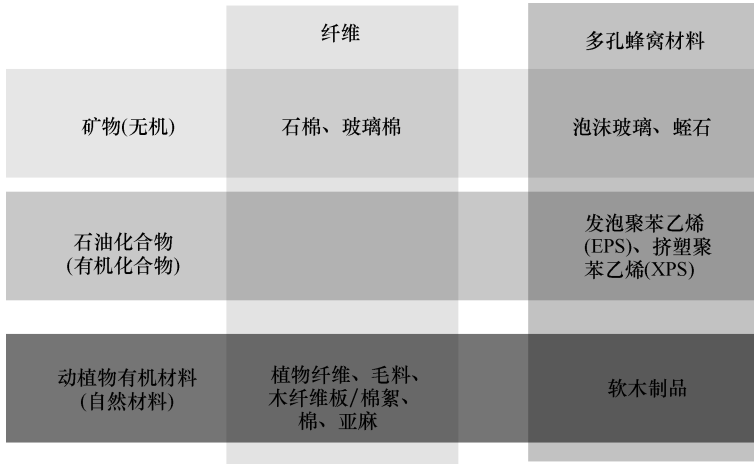


图 2.4　典型的隔热材料

影响建筑材料选取的另一个因素是其对室内空气质量的影响。一般来说，天然材料释放的不良气体更少，尽量避免使用 PVC 材料。2007 年 2 月，美国绿色建筑委员会（USGBC）公布了一份为绿色建筑认证评分体系绿色能源与环境设计先锋奖（LEED）提供的报告，文中提出，由于 PVC 材料会释放二恶英，因此一直被列为对人类健康最为危害的材料之一（参见 www. usgbc. org/ShowFile. aspx? DocumentID = 2372）。

2. 2. 2　太阳能辐射得热

建筑物内由阳光辐射带来的热效应称为太阳能辐射得热。建筑物可获取的热量的大小取决于太阳辐照的强度、辐照的角度、建筑玻璃对日光的透射和反射的效率。另外，还与建筑物内的蓄热材料数量和类型有关。一般来讲，我们希望在冬季建筑物内的太阳能辐射的热量要尽可能多（以满足供暖需求），而在夏季要尽可能少

(以降低制冷负荷并减少太阳眩光)。

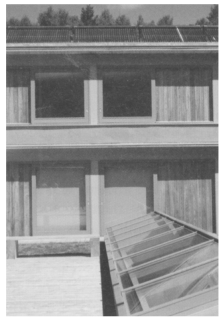
良好的建筑设计能够利用格局规划、建筑物朝向、窗户和出入门采用玻璃结构等方法来减少对人工照明的需求，使阳光为建筑内提供舒适的环境温度。可以通过选择适合的玻璃、遮阳结构、蓄热体和其他因素来达到上述的要求。通过改变多层玻璃窗上内层玻璃表面的涂层和材料组分来优化“温室效应”，而窗户的尺寸、位置、遮阳结构等的优化则有利于最大程度地获取太阳能热量。

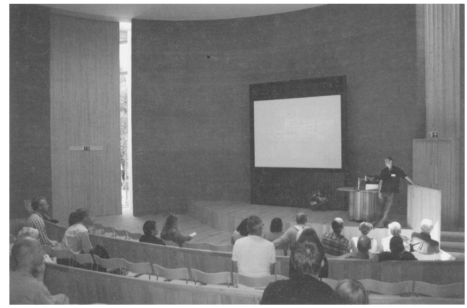
太阳能辐射得热可分为直接和间接两种方式：

1）日光直接照射入室内（通过窗户、天窗、暖房等）使蓄热材料升温，然后吸收和储存的热量会慢慢地散发出来。这种形式称为直接辐射得热。

2）房间内的蓄热材料受到阳光照射后升温，蓄热材料的温度高于室温后，将热量传递给室内空气，产生空气对流，并与室内空气换热。这种形式称为间接辐射得热。

英国可替代技术中心的威尔士环保教育学院（WISE）是一栋高效使用太阳能辐射得热的成功建筑案例（见图 2.5）。这栋建筑的讲演大厅上方是一扇设计精巧的巨大天窗，这扇巨大的天窗有如天文观测平台屋顶，白天可以通过旋转开窗的方向使采光最优化。这座巨大建筑的密封性非常优良，但是室内的空气每三小时就能更换一次，屋顶上还铺有面积为 $70m^2$ 的可拆卸太阳能热水管，这些热水管与锅炉设备一起为建筑内部提供日常用热水。同时建筑采用可再生的电力能源，这些电力来源于邻近建筑上的 6.5kWp 的太阳能电池板。





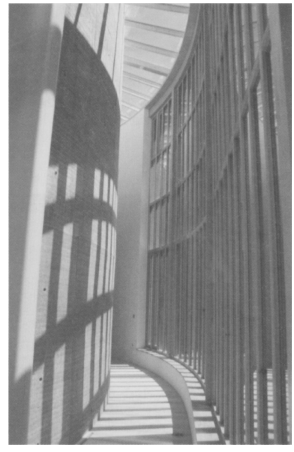


图 2.5　英国可替代技术研究中心的威尔士环保教育学院采用被动式太阳能设计为建筑提供部分供暖，例如，主报告厅是由夯土厚墙围成的圆形大厅，厚墙外的南侧和西侧安装有巨大的落地窗，与围墙形成走廊，这样阳光能够照射到高蓄热的厚墙上，厚墙吸收的热量在晚间释放出来。这种夯土结构与德国的“和解大教堂（the Chapel of Reconciliation in Berlin，Germany）”的设计类似

2.2.3　烟囱效应

一般来讲，“烟囱效应（Passive Stack）”是通过对流来实现的，烟囱效应机理就是热空气比冷空气更容易上浮（见图 2.6）。

在建筑物内部，热空气上浮到建筑物顶端排放出去。在热空气排放出去的同时，建筑物内部的气压会变低，那么冷空气就会从门窗等开放区域被吸进来，当然也可以通过通风系统送入。优秀的被动式太阳能建筑会善用这种气流交换特性来进行热循环和通风（见图2.7）。在采用密闭外部结构的高层建筑中，楼梯井或电梯井内与建筑物内的气压差会很明显。因此必须采取一些措施，如机械式通风、区域隔离、防火门等方法，来避免火灾时带来的危险。

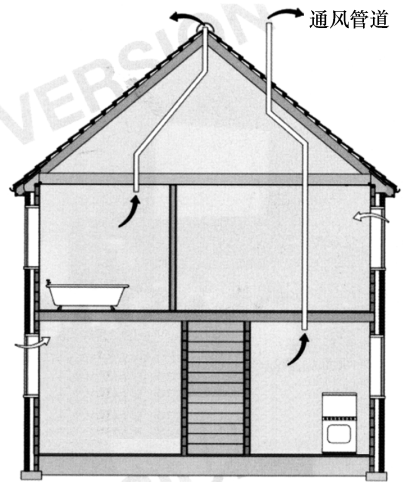


图2.6　烟囱效应示意图。烟囱效应可将高湿度房间内的暖湿空气抽出，然后经穿过阁楼连接到屋顶的管道排放到户外（资料来源：© EST）

图2.7　英国加斯顿的建筑研究所（the Building Research Establishment，BRE）的一栋建筑，采用了基于烟囱效应的太阳能烟囱实现自然排风（资料来源：© BRE）

2.3　气候的重要性

正如第 1 章所言，地球被划分成许多不同的气候特征区域，在不同的气候区域设计环保建筑时，都应采取相应的优化设计来提高能源的利用率，并为居住者提供舒适的环境。限于本书篇幅，这里仅以两种气候特征为代表：寒冷气候条件和炎热气候条件，来研究被动式太阳能的利用和制冷技术，在其他过渡气候区域可以综合讨论过的技术要点，恰当地进行调整设计。

2.3.1　炎热气候条件

我们可以从那些在炎热气候条件下居住上百年的土著居民们的建筑设计中，学到很多实用的设计技术，如古罗马人、埃及人、伊朗人等都曾使用过的通风塔，或是阿纳萨兹人（Anasazi）在梅萨维德建筑的悬崖宫殿（见图 2.8），他们都利用了类似的建筑原则。当然，他们的具体解决方案各有迥异，但都是在详细考察当地季风类型、岩石结构、地下蓄水层位置后，竭力提供凉爽的居住环境。基本的建筑原则是相似的，包括以下几点注意事项：

1）空间规划。

2）建筑朝向。

3）蓄热体设计。

4）窗户的朝向以及大小。

5）外墙材料。

6）遮阳和飞檐。

7）被动式通风系统。

8）相变材料的使用。

如今，经过改进后的建筑物即使不借助电力制冷设施的帮助，人们仍然可以居住得非常舒适。即使无法完全做到这一点，人们还是应该优先考虑上面提到的一些天然优化技术，而不是一味地采用人工排风系统。需要注意的一点就是，人们总是根据季节调整自己的生活习惯。例如，穿戴应季的衣服，冬天在最暖和的时段休息，

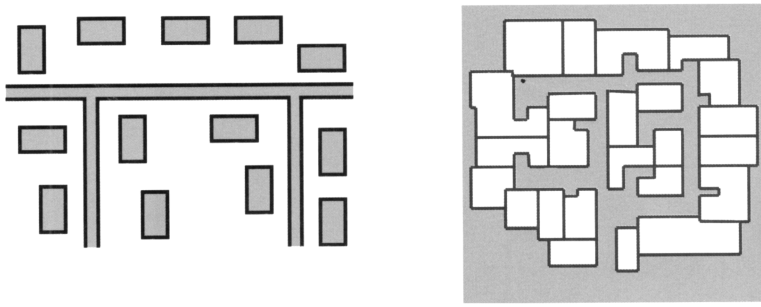
图 2.8　美国科罗拉多州的梅萨维德悬崖宫殿（Cliff Palace at Mesa Verde）是一座适应气候环境的经典传统建筑。屋檐具有遮阳的作用，岩石本身是高蓄热材料，厚厚的墙壁也起到调节室内温度的作用，而较小的窗口阻挡了热量的进入，但同时也提供了足够的光线

夏天搬到较凉快的房室居住等。

1. 空间规划以及平面设计

阿布扎比的城区非常广阔，街道很宽，建筑物之间间隔很大，但这却是一个失败的城市规划，因为这座城市在夏日备受炎热与潮湿的煎熬。而古代阿拉伯的城镇设计却十分成功，建筑群和街道布局紧凑。城镇中街道的设计应该适当窄一些，这样，建筑物可以为街道遮挡阳光直射（见图 2.9 ~ 图 2.12）。还可以建造通风塔，在遮挡阳光的同时，它还可以为建筑物内部通风排气，这是天然节能的好方法。上述的建议以及以下列出的一些空间规划设计原则，将会有助于街区以及城镇内保持相对舒适的温度：

1）减少建筑物之间的间隔，使街道可以被建筑物的阴影全部覆盖。



(a)　　(b)

图 2.9　在炎热气候的城镇空间规则中，图（a）是不恰当的，图（b）是恰当的。（a）采用了网格布局，建筑物的间距很宽，无法提供遮阳和挡风的功能。（b）更接近自然的非网格布局具有遮阳和挡风的功能，并可避免由于狭管效应形成穿堂风

图 2.10　炎热气候条件下的建筑设计需要避免的问题。阿拉伯联合酋长国的阿布扎比是一个失败的城市规划的例子。这座城市被污染和热霾包围着，玻璃和金属结构的大楼高耸入云，吸收了大量的阳光辐射，结果就是所有建筑都要额外增加能源消耗来降低室内温度（资料来源：© Frank Jackson）

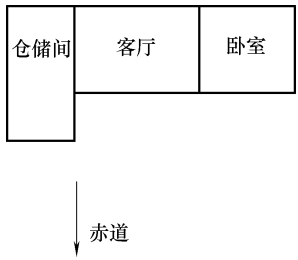


图2.11　清晨的时候，卧室会被部分阳光照射到，而下午的时候，整栋建筑可避免阳光低角度照射进来而产生过热效果，由此可见这栋建筑的布局是很合理的

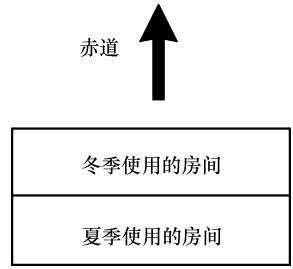


图2.12　炎热气候条件下，人们经常采用的避暑方法是在夏季和冬季分别居住在不同朝向的房间内，这是因为夏季朝向赤道的房间会变得非常炎热

2）庭院可建造得相对小一些，这样一方面可以避免阳光直射到院子里，同时又可以保证建筑物内部的蓄热材料白天能受到阳光的照射而储存热量并在夜间释放出来。

3）庭院较大时，建筑物在白天将吸收更多的热量而使房间温度更高，但晚间房间则降温更快。

4）在街道和庭院内多种植物，这样不仅可以提供阴凉，而且落叶植物还可以挥发水分，使空气变得凉爽，繁盛的枝叶也可以遮挡太阳。

5）减少柏油路和混凝土结构的规模，这样可以使气温下降的幅度超过20℃。

6）通过水幕、池塘、水渠等的水分挥发作用达到降温的目的。

2. 建筑物外墙材料

以下是针对建筑物外墙以及屋顶设计的一些有益建议：

1）建筑的外墙应该用白色或浅色的涂料粉刷以将部分太阳辐射热量反射回去。

2）飞檐的设计要经过缜密计算，使之在夏季时遮挡阳光直射入室内，在冬季时却允许阳光照射到室内。

3）设计建筑时，其东—西方向应比南—北方向更宽，这样在上午和下午，即使飞檐无法遮挡住阳光，也可避免过多的日光照射到室内。

4）在屋顶平台上栽种一些植物，并在露台和院落内架起爬满植物的遮阳架，甬路也可以设计在拱形植物棚架之内。

5）房间的东侧和西侧的窗户设计应该是数量少、尺寸小，以避免太阳光直射到室内。

6）北半球地区房屋的北面、南半球地区房屋的南面的窗户要设计得宽大一些，这样可以使更多的光线进入到室内。

7）避免设计天窗和其他屋顶窗户，以减少中午时段阳光对室内的直射。

8）所有墙体要使用高效蓄热材料，尤其是朝向赤道和东西方向的外部墙面。

9）白天拉上百叶窗和窗帘，晚上则拉开它们以利于通风。

10）建筑物外墙采用隔热设计，若不用隔热设计，则可加厚外墙，这样室内会更加凉爽，室内温度随室外温度变化也会有一段延迟。

在美国萨克拉门托和加利福尼亚地区，炎热夏季的午后时段，仅增加一扇朝向西面的 $5m^2$ 的窗户就会增加 16kWh 的电力消耗，若用空调补偿由增加的窗户导致的温升，所需的空调功率约为 2kW，这样电费无疑将大增。其实，只要建筑物采用恰当的朝向或者使用户外遮阳设施，就能够节省一部分用电量。该地区的早期居住者早就知道如何解决这些问题了，他们的庄园通常是朝南，房屋呈长矩形布局并沿长边建造走廊，在炎热的夏季，由于太阳直射角度高，走廊可以遮住阳光，而在冬季时，太阳直射角度低，走廊刚好不会遮住阳光，室内可以得到充足的日光。

外墙的厚度是决定室外温度传到室内速度快慢的另一因素，隔热与热垒结构可以把高温阻挡在外，但这种隔热设计结构要设计在外墙的外侧。

3. 遮阳

遮阳的目的是在炎热夏季避免日光直射到室内，而在寒冷的冬

季则能让阳光照射到室内。另外，还应让尽可能多的散射光进入室内以降低室内人工照明所消耗的能源，同时还应该考虑自然通风的问题。要能同时满足上述要求，遮阳设计要权衡考虑。

可用的遮阳方法很多，如何选择取决于当地季风的方向以及日光的照射情况（见图 2.13 ~ 图 2.20）。邻近的建筑物、植物、树木、建筑结构等都可以用于遮阳，并且还可以作为挡风之用，它们可以阻挡大风、过滤风中的灰尘（树木）或者把风引导到需要通风或冷却的地方。建筑结构的遮阳设施可以是固定也可以是活动的。固定式的遮阳结构包括飞檐（overhangs）、植物凉棚（pergolas）、遮阳栅、阳台、假顶，室内部分则有反光板、遮阳板等。藤蔓植物可以生长在植物凉棚上起到降温的作用。活动式的遮阳设施包括布篷、室内或室外百叶窗、屏风、卷帘、窗帘等，如地中海地区就广泛使用百叶窗。室外遮阳结构的效率比室内遮阳结构的效率要高 35% 左右，这是由于室外结构可以直接避免日光和热量进入室内。外部遮阳结构的颜色越浅，反射光和热的能力越强。

图 2.13　位于尼日利亚阿布贾的这栋房屋的屋顶覆盖有锡板而房间安装了空调系统，这栋房屋的设计很不合理，它未能解决在阳光充足的炎热地区避免太阳热辐射导致的室内过热的问题（资料来源：© Frank Jackson）

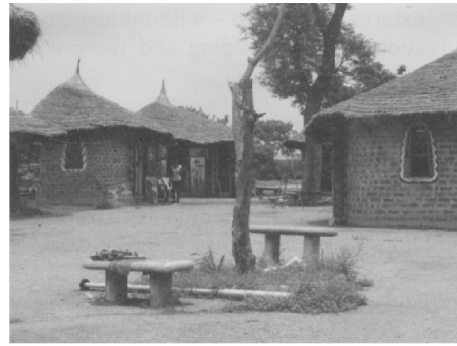


图 2.14　尼日利亚地区采用传统百叶窗结构和茅草屋顶以及飞檐结构的房屋（资料来源：© Frank Jackson）

图 2.15　建于中世纪时代的意大利罗马的圣约翰拉特兰大教堂（St John Lateran，Rome，Italy）就已采用拱廊结构来遮阳（资料来源：© Clare Maynard）

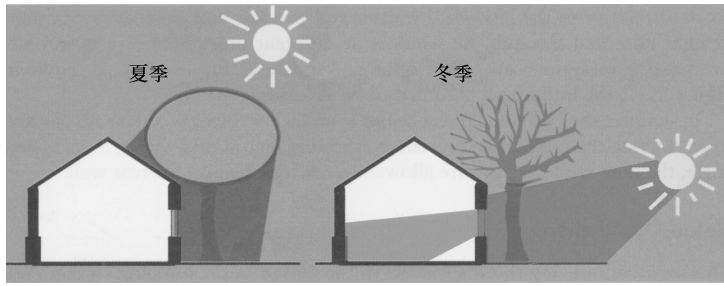


图 2.16　在房屋前面可以种植一些树木，在夏季，树冠可以遮挡阳光，在冬季，日照角度相对较低，日光又可以照射入房间内。落叶植物在冬季脱落树叶后可以让更多的阳光和热量进入到房间内。另外，树木还能抵抗大风，过滤空气中的灰尘

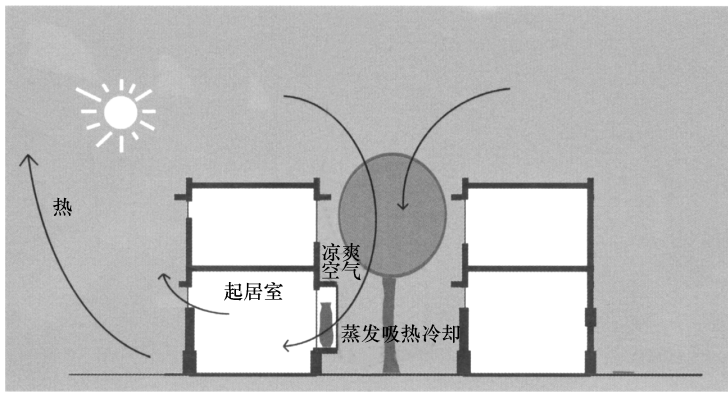


图 2.17　庭院本身就可提供荫凉，若再种植一些树木则效果更佳。这些房子朝阳面的窗户尺寸较小并有遮阳屋檐。除此以外，图片还展示了传统蒸发吸热冷却的方法，空气在进入房间以前，先通过装在陶瓷罐中的水的表面，通过水汽蒸发强化空气降温的效果

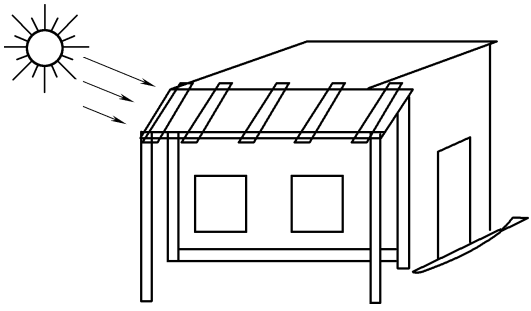


图 2.18　房屋外侧的遮阳凉棚（资料来源：Kishore，2009）

图 2.19　一栋法国的住宅窗前采用遮阳支架来避免刺眼的日光

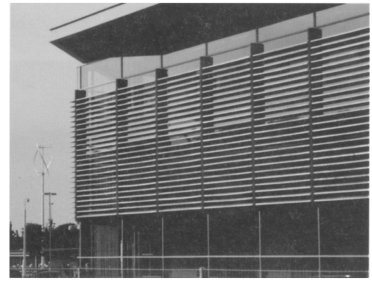


图 2.20　位于阿伯里斯特威斯（Aberystwyth）的威尔士国民议会和地方政府大楼采用了一些非常有效的遮阳方案，并设计了巨大的朝南窗户，在尽可能多地获得太阳光和热的同时，还避免了过于明亮的刺眼光线和室内过热。竖立着的风力发电机为建筑提供电力

室外遮阳结构不能影响晚间室内热量的扩散，基于这个原因，若在屋顶种上落叶植物或藤蔓植物比用水泥板或镀锌板覆盖效果更好，因为在夜间室内热量需要向温度更低的户外扩散。有些传统的建筑在整个屋顶表面放满倒扣过来的瓦罐。也可以白天在屋顶表面盖上一层帆布、晚上再将帆布卷起来，并且这种操作还可以自动完

成，这也是众多传统房屋可采用的另一种廉价的解决方案。

飞檐

窗户上面的飞檐是最常见的遮阳物，飞檐的尺寸要依据房屋的纬度、朝向、窗户的大小等来制定以使不同季节允许进入窗户的阳光照射量不同：夏天时要能挡住太阳直射，避免室内过热，而在冬天则允许阳光进入室内以获得热量。图 2. 21 所示是一栋位于北纬 40°的房屋的飞檐设计参考图。

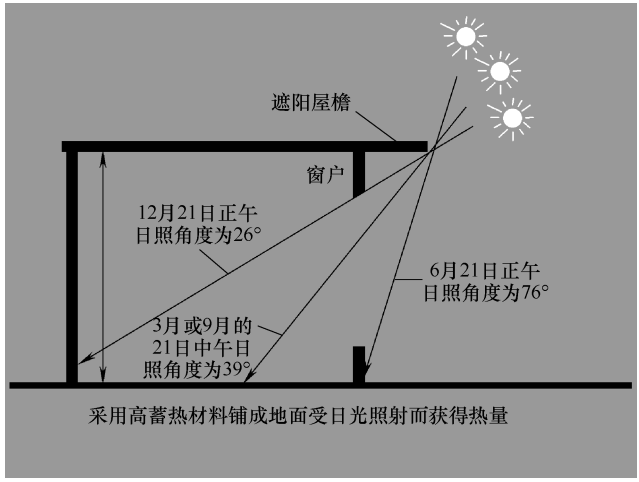


图 2. 21　遮阳屋檐的长短要根据房屋纬度来确定，由纬度估算出日照位置在一年中的变化，再依据房屋隔热保温状况和房屋内需要的日照量来最终确定其长短和位置

在夏季，位于天空正上方的正午阳光被飞檐遮挡在户外，避免室内过热，而在仲冬季节，由于太阳的直射角度最低，飞檐遮挡不到太阳，日光可以进入室内带来温暖（见图 2. 22 和图 2. 23）。

4. 自然通风

该技术包括在建筑规划设计时利用烟囱效应，让户外的凉爽空气进入建筑内部循环，并将室内的暖空气从屋顶排风通道置换到户外，循环的气压差可由两种相互关联的因素产生，即温差和风向。

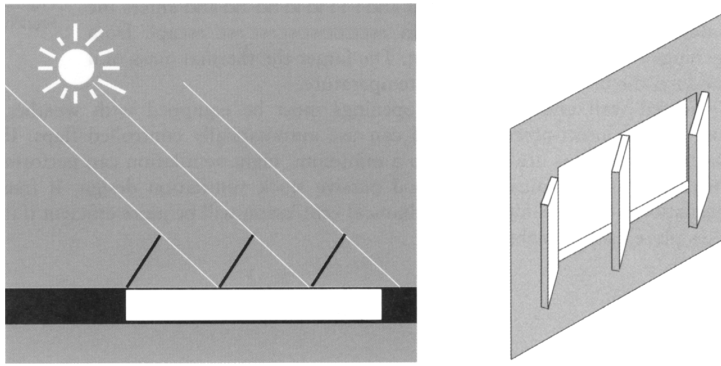


图 2.22　当某些建筑内需要天然采光、又要避免阳光直射导致室内温度过高时，可以采用竖直的鳍板反光板实现遮阳，无论安装在哪个朝向的外墙面，鳍板的平面要尽量垂直于最热时段阳光的照射方向

图 2.23　位于德国柏林的联邦新闻中心的遮阳设计以及遮阳屋檐（资料来源：© Frank Jackson）

冷空气从建筑的下方进风口处进入，进风口要设计在建筑的背阳面以避免太阳直射，或者设计在地下室。如果让冷空气流过水面，则冷却效果更加显著。

通风口大小的设计十分关键，如果风速较为稳定，则进风口的尺寸要小一些，出风口尺寸可大一些。如果风时有时无，则进风口

可开大一点以便使更多的空气进入室内。对于风向不稳定或气候条件不稳定的地区，进风口和出风口的尺寸最好都大一些，并在进风口和出风口处安装活动挡板，以便控制气流的方向和速度。庭院是人们使用了上百年的自然通风的范例（见图 2. 24），白天阳光照在院子内，空气受热上升，其他地方的冷空气，主要来源于室内通过面向院子的门窗，将替代热空气形成空气循环从而使室内空气流通并得以降温。

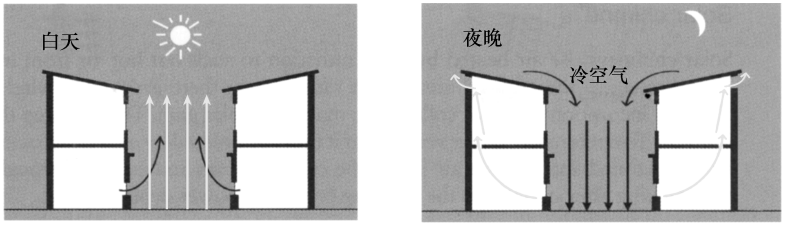


图 2. 24 （a）在白天，庭院中的热空气上升，将室内的空气抽出，形成空气流动。（b）在夜晚凉爽空气从屋顶向下流动到庭院中并由进风口进入室内，替换从房屋顶部排风口排出的热空气

在夜间，这个过程刚好相反。温度较高的屋顶通过对流换热被冷却下来，如果屋顶是朝向院子倾斜的，那么屋顶的相对较低温度空气就向院子流动并进入到室内，而室内的热空气则会从屋顶的通风口排放出去。房屋的蓄热能力越强，室内的温度就会越均匀。

排风设备和通风口要有防止恶劣天气影响、防盗和防蛀虫的保护装置，也可以使用自动控制的百叶片。如果能够尽量避免白天时室内的太阳辐射得热效应，那么房间夜晚的通风效果会更好。建筑物必须具有良好的被动式烟囱效应设计，如果自然通风仅在夜间无法满足要求，则可以使用效率更高的机械排风装置代替。

5. 通风塔

炎热干燥的地区是理论上最适合应用通风塔冷却技术的区域，该技术收集并利用当地的风力。通风塔可以紧贴房屋也可以远离房

屋建造，通过塔的顶端侧面有通风口，通风口朝向当地盛行风的方向，通风塔的内部一般分割成 2 个或 2 个以上的通风道，这样可使气流上下流动更通畅（见图 2.25）。

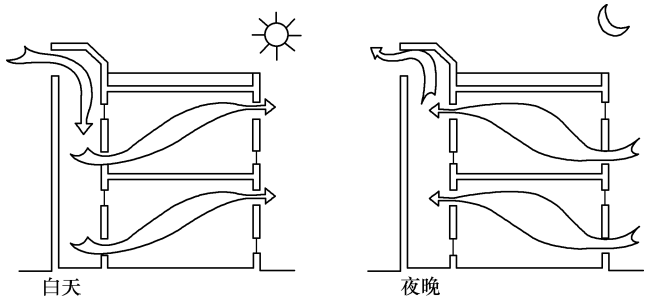


图 2.25　通风塔在白天和夜晚的工作示意图（资料来源：Bansal，Minke and Hauser，1994；Kishore，2009）

在白天，室外空气吹入塔顶的进气口，由于通风塔内外存在气压差，气流被引入房屋温度较低的底部或者地下室，这些进入房间的气流向上流动置换室内空气并从房屋上部的排风口中排出。室内的居住者会明显感觉到室内流动的气流，非常舒适。在夜晚，气流流动方向与白天刚好相反，冷空气穿过房间进入通风塔的底部，并被塔壁加热上升，从塔顶通风口排出，这一循环可将室内的热空气排出。通过这种方法，建筑内的蓄热材料在白天吸收的热量会被缓慢排放出来。

6. 太阳能烟囱

太阳能烟囱是利用太阳光照射产生的热量来加热烟囱内的空气，使其流速加快从而抽出室内热空气（见图 2.26）。在没有风的地区或没有风的季节，这种装置十分有用。太阳能烟囱采用太阳能集热器获取尽可能多的太阳辐射热量来加热烟囱内部的空气，烟囱内部的温度可能非常高，所以要在烟囱与房屋之间增加一层隔热层。烟囱内的空气被加热后会上升，并从顶部排出，这样烟囱会将室内的空气逐渐吸出户外，而房间从进风口处补充进来新鲜空气，起到了循环通风的作用。通风效果的好坏取决于以下几点：

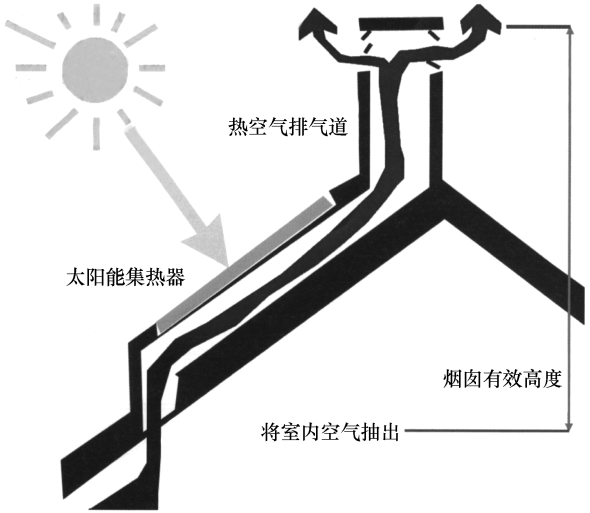


图 2.26　太阳能烟囱的工作原理图。太阳辐射的热量加热烟囱和烟囱内的空气，热空气会上升从烟囱顶端飘出去，并将室内冷空气吸进烟囱

1）太阳能集热器的大小。集热器越大，收集的热量越多。

2）烟囱进气口和排气口的尺寸以及内部形状也很重要，其截面最好是倒漏斗形并且顶部的开口要小。

3）烟囱进气口与排气口的垂直距离越长，产生压力差越大，排气效果越好。

太阳能集热器要安装在烟囱朝阳面上，安装位置要靠近烟囱的顶部，或覆盖整个烟囱。集热器表面涂上黑漆并上釉可收集到更多的热量。

7. 室内进气装置与热交换器

房屋在使用通风塔、太阳能烟囱或其他自然通风设施的同时，还可以增加地下热交换器（见图 2.27）。这种装置使用自然或借助风扇的方式从户外的空气进气口将空气吸入地下，经地下热交换器冷却之后从房屋底部进入室内，并在烟囱效应的作用下从房屋顶部

排出。同样地，空气在进入室内前如果通过水面，则冷却效果更好。相反，如果冬天十分寒冷，这种热交换系统还会对进入室内的空气起到加温的作用。这种装置也称为地热泵。

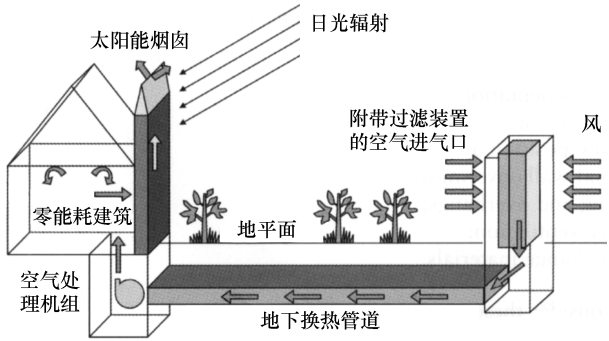


图 2.27　地热交换系统的示意图（资料来源：Kishore，2009）

8. 水分蒸发制冷

水从液体转变为气体或从固体转变为液体时会吸收热量，这种变化称为相变。室内水池会有这种吸收热量的效果，使室内变得舒适，但室内水池的维护成本也很高。这种系统的冷却能力取决于水的蒸发量、空气温度、蒸发速度以及潮湿度（见图 2.28 和图 2.29）。

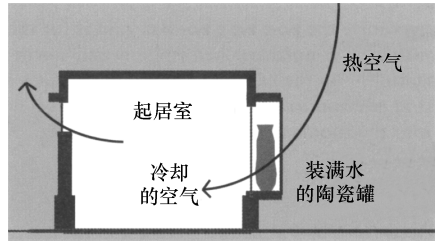
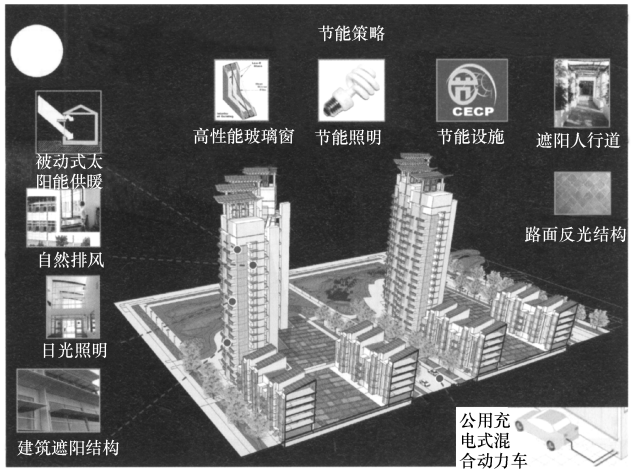
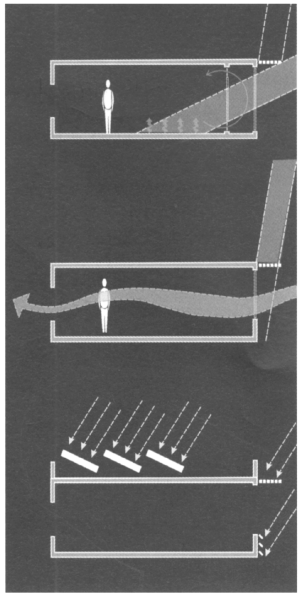


图 2.28　在空气进入室内的风道中放置水，水分蒸发时会吸收空气中的热量，空气也就冷却下来了。让空气通过种满植物的区域也会有相同的冷却效果





被动式太阳能供暖：采用将窗户设计在建筑的南侧，在窗户上安装反光板，并结合夜间保暖措施等方法可以获得单位日照热量的75%。

自然冷却：研究团队认为，利用穿堂风、在屋顶种植植物，并结合适当的遮阳措施，就可以使这栋坐落在天津的住宅只在最热的7月和8月才需要使用空调制冷。

社区发电：建筑师认为，每个居住单元的供暖需求和电力需求可以通过使用太阳能集热器、太阳能光伏发电模组、安装在较高建筑上的风力发电设备以及沼气池等设施来满足。

图2.29　这是在天津（北纬40°）的一个社区计划实施的超低环境影响社区开发项目。在这一居住密度很高的社区中，能源需求几乎可以自给自足。社区的被动太阳能利用方案如图所示。该地区每月日照时间在175～265h之间，包括处于雨季的7月和8月，全年日照时长为2522h。（资料来源：Mott MacDonald）

（1）室内的植物和水

室内的植物叶片会产生相似的冷却效果，而且室内植物还有净化空气的作用，它可吸附空气中的污染物，如悬浮颗粒物、灰尘、有害气体等，另外植物还可以释放氧气，调节室内温度和湿度。除此之外，植物还能隔离声音，吸收外界环境的噪声。在密集种植的情况下，由水分蒸发而带来的冷却能力可以达到 16W/m^2，这一数据是 Preisack 等 2002 年的研究成果，他们研究了许多种植物的制冷效果，发现有一部分植物的制冷效果十分突出。

水景也可以用来冷却空气，在宾馆、餐厅、办公休息大厅等地方，水盆、室内水池、人造假山溪流、水幕墙以及室内喷泉等十分常见，这些设施还具有美化环境的作用。水分缓慢挥发，使室内的空气变得凉爽，低处的凉爽空气还会在烟囱效应的作用下，扩散到整栋建筑空间内。

（2）相变材料

一些在室温范围内可以产生相变的材料，同样可以用在建筑内部。例如蜡，当蜡熔化的时候会吸收热量，而凝固的时候则会释放热量。由于这种特性，蜡可以涂抹在室内的墙面上，以便调节温度。石蜡加入添加剂后可以精确调节其相变温度使其相变点与白天和夜间的温度差相匹配，即白天室温高于相变温度，石蜡熔化吸收热量；夜晚室温低于相变温度，石蜡会凝固放出热量。这样，石蜡材料就可以在 24h 内辅助调节室内温度。

其他的相变控温材料（PCM）还有盐水混合物、脂肪酸、酯类以及合成蜡（如正十八烷）。这些材料可以压制成小块，拼成图画或将其涂在建筑内可以被日光直射的墙面上，也可以用在独立的空调中，借助风扇实现热量的交换。热带地区的通信枢纽设备的机房中也广泛使用相变材料。

2.3.2　寒冷气候条件

寒冷气候条件下的被动式太阳能建筑的设计也有一组需要考虑的关键因素，只是此时需要的是供暖而不是冷却。其关键因素

包括：空间规划，建筑朝向，蓄热体设计，窗户的朝向以及大小，外墙材料，遮阳和飞檐，被动式通风系统，相变材料的使用。

下面逐一讨论这些因素。

1. 空间规划以及建筑朝向

最大限度获得太阳能的最佳方法就是使建筑朝向赤道，即南半球应该朝向北方，北半球应该朝向南方。建筑物应沿东西方向延伸以便更多的日光可以从门窗进入室内，甚至可以直接照射到建筑内背光面的房间。

如果建筑无法设计成上述朝向，也可适当偏转一些角度，以南北方向为轴，向东或西旋转 20°时，太阳能辐射得热仅降低 6%；旋转 25°时，大约降低 10%（见图 2. 30）。一些社区的规划十分有特色，每户都有朝向赤道房间，但又能保证建筑内部的隐私性。

在北半球设计一栋新的建筑时，重点需要确保建筑的南侧朝阳面应该开设尽可能多的门窗，当然东西侧也要有窗户，东侧获得清晨的阳光，而西侧的窗户可以欣赏日落的景色。在建筑的北侧应该减少窗户的数量和窗户的大小，仅够采光即可，这是因为热量从窗户散发出去的速度比从墙壁散发出去的速度要快很多（见图 2. 31）。建筑北侧的墙面由于无法获得日光照射，因此需要采用高蓄热材料或采取严格的隔热措施，以减少热量散发，保持室内温度。如果在南半球，则设计方案刚好相反。窗户的面积过大，会使居住者的隐私更容易暴露，如果采用一些方法遮住窗户，则违背了采光和采暖设计的初衷。为了保护隐私，可以对其优化设计，例如使用一定角度的挡板、采用滤光玻璃以及优化建筑群的设计布局等（见图 2. 32）。

室内地板和墙壁要采用蓄热能力高的材料，这样，在白天可以吸收更多的日光热量，而在晚间释放出来，这意味着不要用地毯、毛毯以及悬挂物等覆盖或遮住瓷砖地面以及高密度材料建造的墙面。

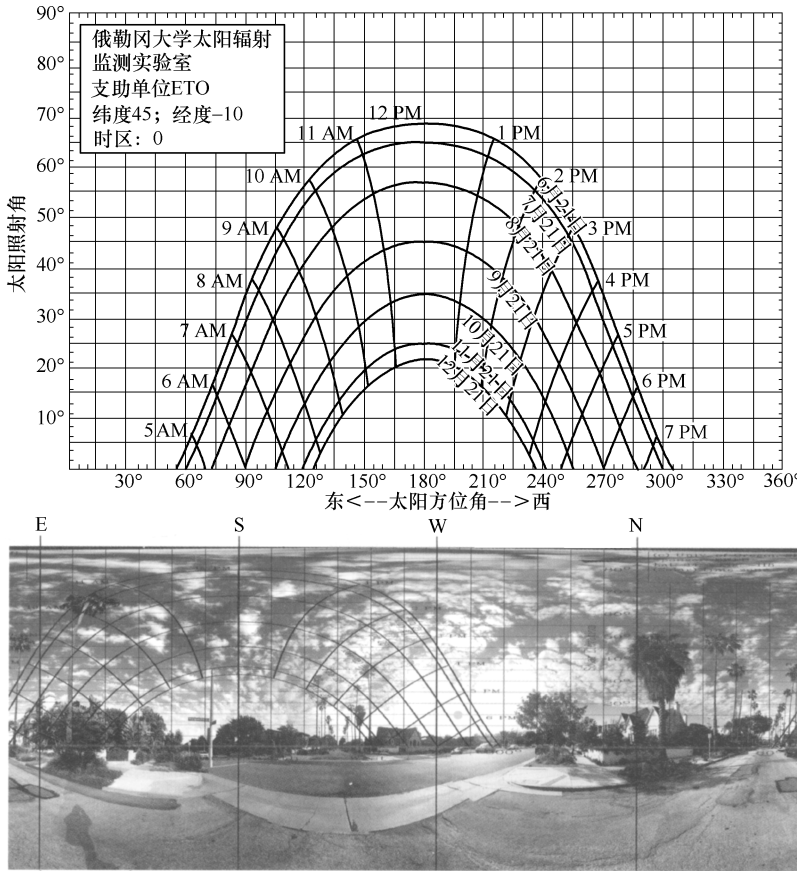


图 2. 30　只需要输入建筑物所处的纬度和经度，就可以利用免费的在线软件（网址为 http：//solardat. uoregon. edu/SunChartProgram. html）计算出一年的不同时间里，太阳相对该建筑的照射角度的变化情况，并以图表形式给出计算结果。该图表甚至可以下载下来并导入到其他图形软件中，叠加在当地的全景照片上，如图所示，这样一年中、甚至每一天中的每个时段的太阳方位角就十分直观了

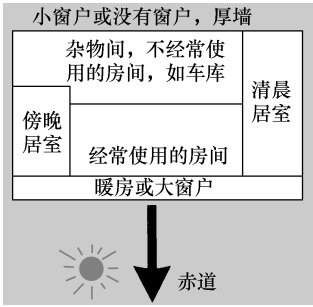


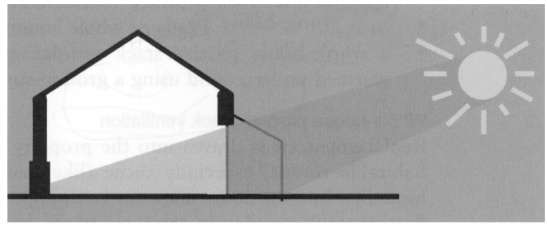
图 2.31　规划住宅的房间布局时，应该将起居室设计在朝向赤道的方向，杂物间以及不经常使用的房间如车库等（如果有的话）设计在房屋的背向赤道一侧

图 2.32　从这幅住宅规划图可以看出，所有房屋都是朝阳的，这样可以更好地获得太阳光照。同时，通过优化窗户的位置，增加建筑的附属结构、树篱隔离带等措施，有效地保护了居住者的隐私（资料来源：© P. Borer）

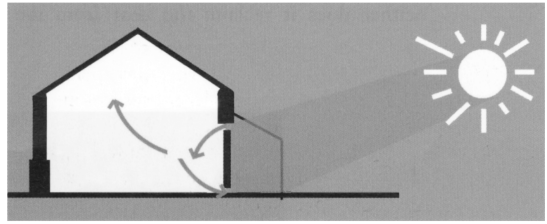
2. 暖房

暖房可以看做特隆布墙（Trombe Wall）原理（参见第 4 章）的扩展应用，区别在于暖房位于蓄热墙体的前面而且通体为玻璃结构，暖房的地面也要采用高蓄热材料并且要与土壤层完全隔热（见图 2.33）。与暖房相连接的蓄热墙体的顶部和底部最好有与建筑内部联通的开口，以便形成气流的循环。另外，还可以采用导热系统将热量直接输送到室内更远的地方。

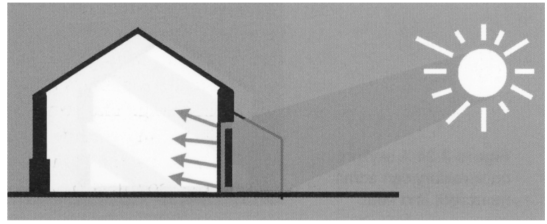
暖房要设计成朝向赤道的方向，或在建筑的西侧，它们在中午以及下午的时段收集太阳能热。在暖房里面坐一坐通常会感觉很舒适。一般来讲，不要在寒冷的天气给暖房额外供暖，除非暖房的隔



(a)



(b)



(c)

图 2.33　暖房与其他房间传递热量的方式：（a）直接式；（b）通过暖房后墙顶部和底部的通风口形成空气对流；（c）日光加热高蓄热暖房后墙，然后通过热对流和热辐射为其他房间提供热量。在暖房后墙顶部的通风口处安装送风管道，可以将热量传递到距离暖房更远的房间，尤其对于较大型的建筑。送风管道要尽可能笔直，并可以将管道逐渐升高，以便利用烟囱效应来传递热量

热效果非常好，如屋顶采用结实的隔热材料、玻璃的透光性能优良，因为这样可能会产生相反的效果。暖房可以建在结实的房屋外墙上，或镶嵌在墙面内。

3. 屋顶采光

在屋顶设计采光窗户可以使居住者直接看到蓝天，这种效果非常好，但是要注意防止白天室内过热，以及夜间和寒冷季节热量的散失。采光窗的设计原则与前面介绍的类似，从屋顶窗户照射进来的日光应该直射在蓄热能力强的材料上，如墙面（见图 2. 34 和图 2. 35）。

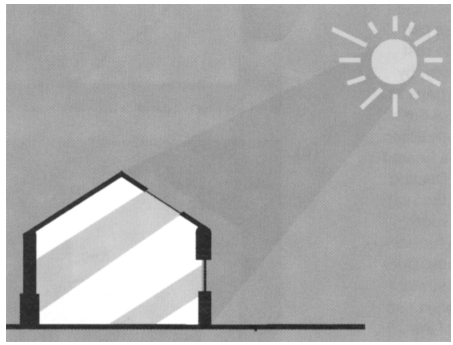


图 2. 34　使用天窗或较高位置的采光窗，可以使房屋内获得更多的阳光和热量

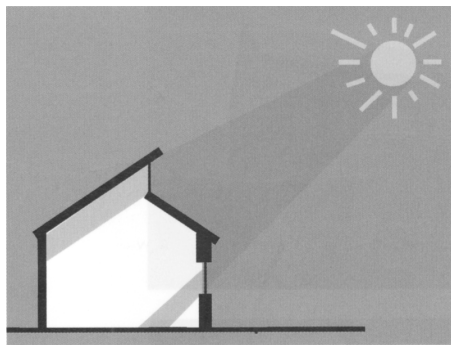


图 2. 35　通过采用天窗、高位采光窗或透光顶棚的中央大厅来使建筑内获得更多的阳光。并可以在建筑内中心区域设置一些热量收集器，全天候收集热量。这些热量可以散布到建筑内的其他位置

4. 热量分布和空气循环

上述在室内获得太阳能热量的方法都是通过日光直射到室内而获得的。设计时应能允许太阳能热量通过对进入室内的空气进行预热、应用烟囱效应以及机械通风余热回收系统（MVHR）等方法通过传导、辐射、对流等形式传递到建筑物内的其他位置。适量的空气循环是必要的，因为这样可以将室内的污染物排出，控制湿度。设计的原则是“设计紧凑，通风合理”，可采用的方法包括：

1）利用烟囱效应的整体建筑通风系统。

2）只对潮湿的房间或整体建筑的机械通风余热回收系统（MVHR）。

3）利用烟囱效应的整体建筑通风系统并结合使用空气进入室内以前通过地热交换系统进行预热。

（1）建筑整体的被动式通风

进入建筑物内的新鲜的空气经细流通风设备送入有人频繁进出的房间，尤其是浴室、厨房等湿度较高的房间，这些房间的房门在设计时要预留一些空隙以利于空气循环。被动式通风系统利用烟囱效应通风，而没有采用机械排风设备，因此可以节省电费，但是这种方法不可避免地也会由排出的空气带走一部分热量。为了减少这种热量损失，最好在室内安装湿度传感器来控制送气开关，这样可以仅在需要换气的时候才开启通风系统。主要房间内最好都装有与排风装置阁楼连通的通风管道（见图 2. 36 和图 2. 37）。

图 2. 36　这是德国柏林火车站的顶棚设计，其利用太阳能玻璃和自动窗户来实现室内的通风冷却效果（资料来源：© Frank Jackson）

(a)

(b)

图 2.37　位于英国威尔士，名为 Larch House（落叶松之家）的崭新三居室被动式节能住宅。其南侧（a）和北侧（b）的外观如图所示，之所以称之为 Larch House，是因为这栋建筑的外墙表面采用了当地生长的落叶松木材。由图可知，这栋房屋朝向赤道一侧的窗户都很宽大，而背向赤道一侧的窗户都十分窄小。这栋建筑的其他特色包括采用了封闭式的木结构、将穿堂风降到最低、采用高隔热保暖设计、使用当地的岩石来制作蓄热体，还包括了使用太阳能集热模组和太阳能光伏发电模组。这栋建筑的密封特性达到了很高的标准，超过了被动式节能住宅的标准，50Pa 压强下，每小时空气置换率平均值为 0.197，而该标准值为小于等于 0.6（资料来源：BRE）

（2）夜间通风

当夜晚户外温度在 21℃以下（如在中欧地区）、而室内温度相对较高时，室内蓄热材料在白天吸收的热量可以通过夜间被动式烟囱效应从屋顶排放到室外，户外温度较低的空气从建筑底层的进气

口被吸入。但是需要注意的是，这些进气口或进气窗要设置保护装置，以避免天气的变化以及盗贼或昆虫的侵扰，最好是使用自动控制栅板。建筑物内部的蓄热能力越高，则室内温度的分布越均匀（见图 2.38）。

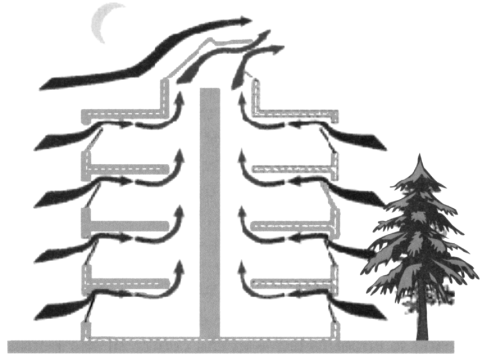


图 2.38　晚间通风，装有护栏网的通风折板或通风窗在夜间自动开启，使房间内的热空气排放出去，补充进来户外的凉爽空气

5. 办公建筑的太阳能利用案例分析——里斯本的 Solar XXI 综合楼

这栋建筑在葡萄牙里斯本的 1500m^2 的多功能建筑采用自然通风方式，运作起来几乎不耗费能源，而建筑成本据说只比相同规模的传统建筑物稍高一些（见图 2.39）。办公区在建筑内部的南侧，以便获得最佳的采光条件和太阳能加热效果。不经常使用的场所，如实验室、会议室等，都布置在建筑内部的北侧。办公区工作日的工作时段为早上 9 点至下午 6 点，通风系统的工作时段与此对应。建筑的屋顶和外墙采用高储热能力的材料，并且建筑的南侧外墙装有 100m^2 的太阳能电池板，且大量采用玻璃透光结构。屋顶装有 16m^2 的太阳能集热器可为室内提供辅助供暖，同时取代了热水锅炉为建筑供应热水。峰值功率为 18kWp（kWp = kilowatt-peak，标准测试条件下额定输出功率）的并网太

阳能电池阵列为建筑提供电力，另外还有一些供电用太阳能电池板安装在邻近的停车场，这些太阳能电池板同时也为停车场提供了遮阳的作用。整套系统能够满足 6.6kWh/m^2 的供暖需求和 25kWh/m^2 的制冷需求。建筑的年用电量大约为 17kWh/m^2，其中 12kWh/m^2 的用电量由太阳能电池阵列提供，其余 30% 的电力由电网补充。

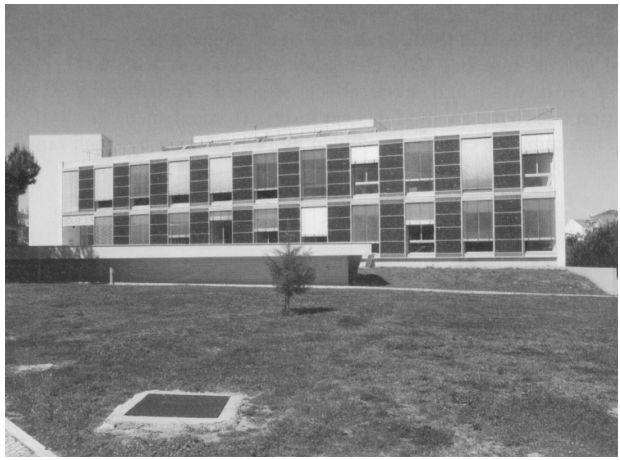


图 2.39　里斯本的 Solar XXI 建筑是隶属于葡萄牙国家能源地质实验室（LNEG）的一栋综合楼，包括办公室和实验室（资料来源：International Energy Agency，IEA）

建筑内部使用自然采光技术。中央大厅顶部的天窗结构为这栋三层建筑中的走廊和北侧办公室提供了自然光线，而人工照明用电负荷仅为 8W/m^2。楼内没有主动式的冷却系统，并且建筑的窗外安装有百叶栅装置，阻止阳光直射入室内。建筑的外立墙和内部房间之间的开放式设计以及楼顶的通风天窗等都起到了改善自然通风的作用，并形成了烟囱效应，促进了空气的循环。由于太阳能电池板会吸收太阳能热量，因此需要安装额外的辅助排风系统通过对流来抵消这部分热量。为达到此目的，在需要制冷的季节，通过小型风机使户外空气在进入室内前先通过一排预埋在地下的管道，户外

空气在此与土壤进行热交换而被预先冷却后再进入室内，如图 2.40 ~ 图 2.43 所示。空气进气口是可调式的，进入建筑的空气从建筑的底部沿着中央大厅扩散到整栋建筑内。该建筑的排气系统需要人工操作，工作人员在操作前需要进行培训。在其他一些建筑中，类似的排风系统可通过传感器进行全自动控制。对这栋建筑内的使用者进行的调查结果表明，人们对空气质量和温度方面的满意度为 70% ~95% 。

图 2.40　掩埋式热交换空气预冷却系统布局的平面规划图和剖视图（资料来源：IEA）

图 2.41　建筑房顶安装的复合抛物面聚光式太阳能集热器（资料来源：IEA）

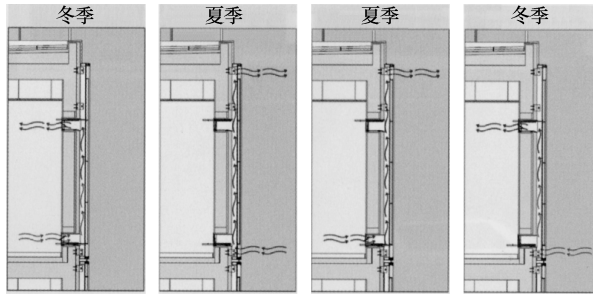


图 2.42　横向、纵向通风系统和地下掩埋式预冷进气系统协同工作（资料来源：IEA）

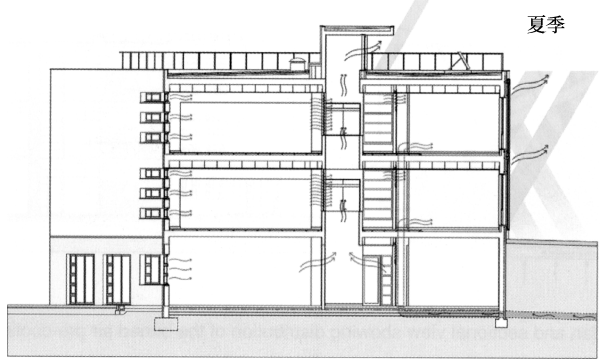


图 2.43　使用太阳能光伏发电模组为通风系统提供电力，将室内湿热空气排出的方案（资料来源：IEA）

专栏 2.2　热封套

在建筑行业中，建筑的外层结构称为“热封套”或热围护结构。对于被动式太阳能建筑，在寒冷季节需要通过最优化热封套特性以保持住从阳光中获得的热量，而在炎热季节里，采用相同的优化方法把太阳热量阻挡在建筑外以减少制冷的费用。具体方法包括：

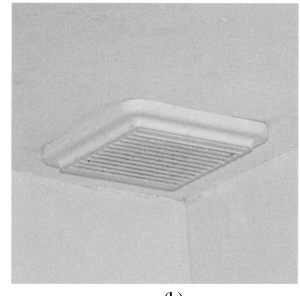
1）连续的空气阻隔层。
2）完全连续的高效隔热保温层，不要留有任何间隙。
3）高隔热性能的门窗。
4）减少室内外热量传递的路径。
5）维持或提高透气性，即墙壁吸收室内潮气的能力。

6. 机械通风余热回收系统（MVHR）

（1）不常使用的单独房间

图 2.44 和图 2.45 为使用频率较低的房间（如浴室、厨房等）

(a)


(b)

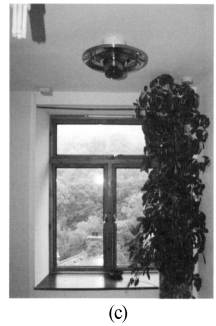

(c)

图 2.44　为浴室等房间提供通风和热回收的独立热交换系统和传感器。（a）热交换器，（b）通风口，一般安置在浴头上方，以便于排出暖湿空气，（c）热交换的出气口，为室内通入预热后的室外新鲜空气

进气口和出气口安装示意图。进气口和出气口要间隔一段距离以免进气口吸入排气口排出的空气。室内进气口和出气口的安装要遵循相同的原则，从室内到热交换的连接管道要安装在可拆卸地板下面以便于维护。利用湿度传感器（如安装在浴室或卫生间上方）自动控制排风风扇的开关，当室内湿度到达一定程度的时候，排风风扇将自动开启。

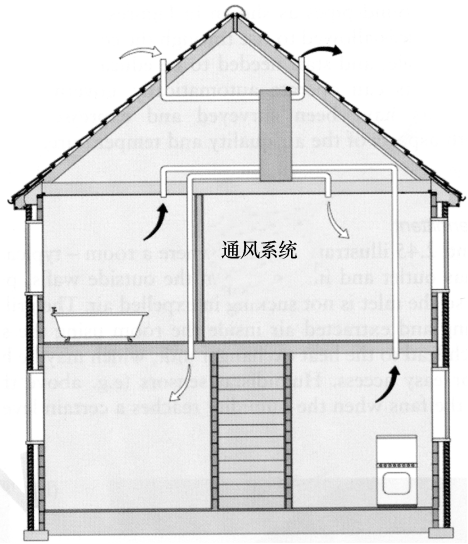


图 2.45　采用机械式通风系统并附带热回收装置的空气循环系统住宅布局设计图（资料来源：© EST）

（2）整体通风系统

在 50Pa 气压条件下，若房间的气密性测试结果为 $5m^3/h/m^2$，就应该安装整体通风系统。通常，房间内的潮湿空气通过管道输运到阁楼内的热交换器，与即将进入室内的空气换热。这些预热过的新鲜空气由一台低功率的风机输送到各个房间中去。风机可由太阳能电池板供电，在此条件下它只能在白天阳光充足的时候工作。

先进的热交换系统可以在夏季进行过程相反的换气，有效地为室内提供凉爽的空气（见图 2.46）。

图 2.46　安置在顶楼并为整栋建筑的通风提供预热的独立式热交换系统
（资料来源：© Chris Twinn）

（3）热泵空调系统

如果条件允许，热泵可以从地面、空气以及水面附近获得热量，其工作原理与电冰箱类似，但是过程是相反的。换句话说，热泵系统对体积较大的低温气体进行压缩得到体积较小、温度较高的压缩气体。地热热泵的效率最高，用它供暖可以节省大量资金，并减少碳的排放量。一般来讲，热泵每消耗一个单位的能量，可以为室内带来 3 个或 4 个单位的热量。普通热泵由电力供电，如果采用可再生能源提供电力，那就非常理想了。如果无法使用可再生能源供电的热泵，那么也可以使用效率为 95% 左右的燃煤或燃气新型锅炉供热，两者的效率差不多。这是因为目前 70% 的电力来源于燃烧化石类燃料的火力发电站，而燃料燃烧、电力输运等一系列环节都会有能源损耗，导致效率降低。但若地热系统持续运转的性能系数（Coefficient Of Performance，COP）大于等于 4.0 时，则用电

力供电的地热系统的效率将比锅炉供热更高。

在图 2.47 和图 2.48 所示的通风系统中，空气由户外的通风口经盘绕预埋在地下至少 3m 的管道进入室内，然后经位于朝向赤道的大窗下方的出风格栅排出室外，这样进来的空气就会在烟囱效应的作用下充满房间。当空气温度不是很高时（16～24℃），系统的工作效率非常高。由于地面以下的土壤温度常年都是相对恒定的，因此这套系统会随户外温度的不同，既有供热的效用，又具有制冷的功能。为了达到更好的冷却效果，地热系统可以进行相应的优化，使之在夏天使用时，室外空气经地下管道冷却以及排出室内热空气的效率最高。地热系统的使用寿命很长（系统设备的典型寿命为 20～25 年，地下换热盘管为 50 年）。

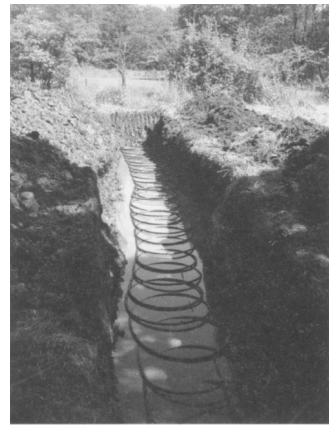


图 2.47　预埋在沟道内的地热换热盘管（资料来源：© John Cantor）

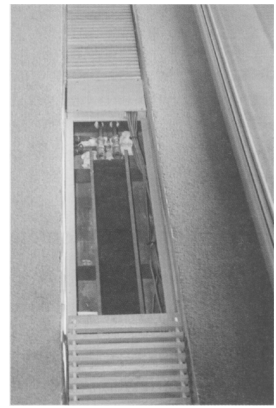


图 2.48　空气进气口设置在户外花园内，并经由预埋在地下的地热换热盘管，从出气口进入室内。这样空气在进入室内前就已经被预热了

7. 太阳光和热的控制

如果住宅朝向赤道或者西面的窗户过多，那么在春、秋和冬季进入房间的热量和阳光可能会过多。既要利用白天的太阳光进行采光、供热或制冷，同时还要避免过多眩光干扰，对设计者来说是个很大的挑战。尽管太阳在至日如冬至、夏至前后 6 周内照射角基本不变，但在至日前后的供热或制冷的需求却明显不同，使用 THERM 软件（即二维建筑热量传递建模和被动式建筑扩展包（PHPP））设计和建模时要考虑这个问题，有关软件的详细信息可参考第 10 章。如果房屋需要飞檐来避免正午阳光直射，则要根据建筑所处的纬度进行具体的设计。然而当太阳照射角度降低时，日光仍然可以不受飞檐遮挡而照进室内，一种永久和固定的解决方案是在第一层窗户的玻璃内侧涂上“日光控制涂层”，这种涂层可以根据设计要求，精确控制反射阳光的比例，避免过多的日光进入室内。这种方法特别适用于朝向赤道或朝西的暖房窗户，因为这种朝向的窗户日照时间长，房间过热的概率较高。屋顶的天窗玻璃同样可以采用这种涂层来反射比如为 70% 的太阳光热量（见图 2. 49 和图 2. 50）。

可以根据居住地以及居住者的要求采取不同的解决方案：

1）室内：遮阳隔热帘，硬式可折叠室内百叶门窗，手动或自动软式遮阳窗帘或百叶遮帘。

2）户外：百叶式户外遮阳装置，户外升降式遮阳幕或遮阳棚。

遮阳装置在地中海的部分地区已经使用上百年，这些装置可以根据不同的时段进行调整，以便达到更好的遮阳效果（见图 2. 51）。采用适当的遮阳设施或多种遮阳设施组合可以使室内制冷消耗的能源降低 50% ~100% 。遮阳自动控制系统已经能够在市场上买得到，它可以根据温度、日照强度、日照时段、房屋内是否有人等自动控制遮阳和隔热设施的运转。但这些设施的能源消耗量也是值得注意的，包括设备的生产、安装、使用等过程的能源消耗，要确保其能源消耗不会超过使用空调设备所消耗的能源。对欧洲一

图 2.49　可调式太阳能烟囱可以用来调节室内温度，避免室内过热，如照片所示的英国诺丁汉税务局办公楼。这栋建筑竣工于 1995 年，曾是英国环保建筑的典范。混凝土材料是很好的蓄热体，在夜晚，这些材料与从户外引入的新鲜空气进行换热，整栋建筑会逐渐冷却下来。在建筑的拐角处设有玻璃外表的柱状楼梯塔，日光充沛的日子，塔内的空气被加热上升，并在顶端排出，为建筑整体通风提供辅助作用。楼梯塔的顶部是一顶纤维结构的大伞，可以起到控制空气进出的作用。在炎热的天气，这顶大伞升起来，排出热气。寒冷的天气，这顶大伞降下来保存室内的热量。这栋楼房在建筑时大量使用了预制部件，承重墩柱是在一家当地的工厂使用当地产的砖块预制而成的，建筑外围的金属支撑杆也是预制好的，每个支杆的长度与单层楼层的高度相同

些建筑物的调查研究表明，这些自动控制系统具有更强大的遮阳效率，相应地也就大幅减少了制冷设施所消耗的能源。在新建或翻修房屋时，设计者应综合考虑建筑的组成部分（如窗户或外墙的遮阳、通风和隔热性能），使之具有更大的节能潜力。

若房室的窗户在夏季时日照过强，而在冬季又需要阳光，则可以在房屋前面种植一些落叶植物。夏天，树冠可以遮挡阳光，而冬天，树叶自然落下，日光可以进入室内。

图 2.50　这栋位于加拿大魁北克省的 Éco Terra™ 住宅由 Alouette Homes 公司设计和建造，总面积为 240m^2。采用预制组件，现场组装的建筑方式。这栋住宅整合了主动式和被动式太阳能系统使热量损失最小化。房屋主体和地下室的混凝土通风板可以接收日光照射而蓄热，并缓慢地释放出来，尤其是在夜晚。安装在房顶的太阳能光伏发电和太阳能集热器一体化热量收集系统用于加热空气，这些空气可以通入房间，起到供暖的作用，也可以用这些热量为房屋提供热水以及衣物烘干，收集到的多余电力可以并入电网（资料来源：IEA）

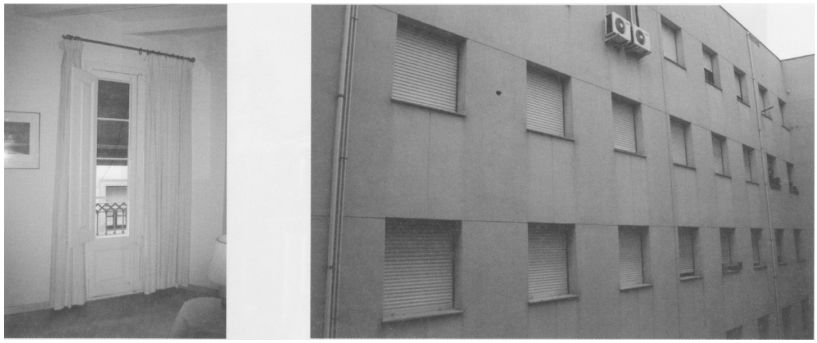


图 2.51　建筑外部的百叶栅、内部百叶窗、阳台上的遮阳架（透过窗户可以看到），以及白天遮住窗户的窗帘都可以将多余的热量阻挡在户外

专栏 2.3　瑞士福尔克斯维尔（Volketswil，Switzerland）的 Erlenweg 公寓

并非所有利用太阳能的环保建筑都会大力宣扬其太阳能利用的特色。事实上，很多人不愿意居住在外观上明显可以看出是环保建筑的住宅内。这栋位于瑞士苏黎世的公寓通过制定细致有效的翻修方案来获得更高的节能效果（见图 2.52）。在预算范围内，改善了外墙的隔热保暖效果，在屋顶增加了太阳能真空集热器和排风系统。翻修还包括增加了外墙隔热、屋顶隔热、地下室顶棚隔热系统，还增加了导热管道和热水管道。其他增加的太阳能设施包括南侧外墙的百叶栅，所有窗户上安装升降式百叶窗收纳盒，以及一扇崭新的玻璃大门。公寓翻修后节省了 62% 的能源消耗。

图 2.52　Erlenweg 公寓楼（资料来源：© IEA-SHC（2009-11-SolarUpdate））

专栏 2.4　U-values（*U* 值）和 R-values（*R* 值）

U 值和 *R* 值是用来表征热量穿透某种材料或某种建筑结构（如窗户）的速率的参数，由该值可以得知材料的隔热性能。美国使用 *R* 值，其他地区基本上都使用 *U* 值。

U 值定义为每小时每平方英尺每华氏度的英制热量单位（Btu），或者每小时每平方米每摄氏度的瓦特数。*U* 值越低，隔热效果越好，*R* 值则正好相反，即 *R* 值越高，隔热效果越好，其单位为 $m^2℃ \cdot h/W$（公制）或 $ft^2℉ \cdot h/Btu$（英制）。使用 *R* 值时一般不需要附带单位，如 *R*-3.5，1 公制 *R* 值等于 5.67446 英制 *R* 值，而 1 英制 *R* 值等于 0.1761 公制 *R* 值。一般根据上下文以及数量级就可以判断出使用的是公制还是英制 *R* 值单位。

8. 窗户

对于窗户，粗略的设计原则是窗户的总面积不要超过房屋地面总面积的1/4；若没有遮阳设施，至少有一半的窗户要建造在朝向赤道的方向上。在冬季，窗户会比墙面更容易将热量散发到户外，对于需要供暖的房间尤其需要考虑到这一点。

目前，美国市场销售的玻璃窗户都需要由美国相关认证机构进行测评，出售时要附带评测结果的能效标签，标签要包括整扇窗户（包括窗框）的 U 值（见图2.53）。在温带以及寒冷的气候条件下要选择 U 值不高于0.35Btu/h × ft² × ℉的产品，有些包含三层玻璃的窗户的 U 值低于0.15Btu/h × ft² × ℉。在亚热带和热带地区，窗户的 U 值要低于0.60Btu/h × ft² × ℉。作为比较，普通清净的单层玻璃窗户的 U 值约为1.0Btu/h × ft² × ℉。具体数值还与窗框的材料有关。这些值都是美制/英制值，如果换算成国际单位制（SI）U 值，大约是这些英制值的5倍多。例如国际单位制（SI）中，低能耗被动式建筑标准要求窗户的玻璃和窗框的 U 值不得高于0.80W/(m²K)，这意味着窗框要采用隔热材料，而窗户要选用三层玻璃。作为比较，普通新住宅窗户的整体 U 值一般为1.8～2.2W/(m²K)。

窗户上的性能标签通常包含以下信息：

1）等级，如A、B、C等。

2）能效，如，－3kWh/(m²K)/年（即每年每平方米损失3kWh能量）。

3）U-值，如，1.4W/(m²K)。

4）空气渗透引起的热量损耗，如0.01W/(m²K)。

5）太阳得热SHGC值或 G 值，如0.43。

（1）遮阳系数

遮阳系数是用来衡量一扇窗户遮挡太阳光能力的一个参数。在欧洲，这一系数称为“G 值”，而在北美，这个参数被称为“太阳得热系数”（Solar Heat Gain Coefficients，SHGC）。G 值或SHGC值的取值范围是0～1，较低的数值代表窗户可以更好地阻挡阳光热

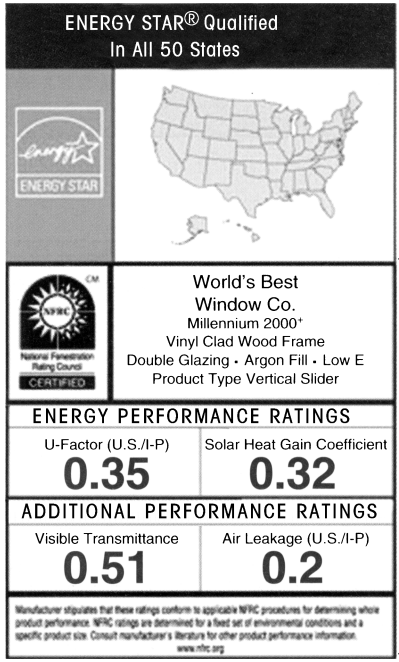


图 2.53　在美国销售的玻璃窗的能效标签样本

量向室内的辐射。遮阳系数由两部分数值组成：一部分是直接透射过窗户入射到室内的太阳辐射的能量（T 值）；另一部分是太阳辐射被玻璃或窗框（以及遮阳设施）吸收后，又向室内发出的二次辐射。

在温带或更凉爽的气候条件下，朝南窗户的 SHGC 值建议高于 0.76，贴有低辐射（Low-E）硬膜或无任何涂层的玻璃可符合该要求（见图 2.54）。朝西的大面积窗户玻璃应该贴有低辐射膜使其 SHGC 值低于 0.6，以避免室内过热。在热带气候条件下，制冷是主要的需求，此时窗户的 SHGC 值最好低于 0.5，生产商可提供的贴膜种类非常丰富，有些贴膜只允许 6% 和 8% 的热量辐射进入房间。为高纬度地区的环保住宅特制的单层玻璃具有高透光的外表面，允许 80% 的太阳光和 71% 的太阳热量辐射进入房间，而贴有低辐射膜的三层玻璃的透光率只有 65% 左右（见图 2.55 和图 2.56）。

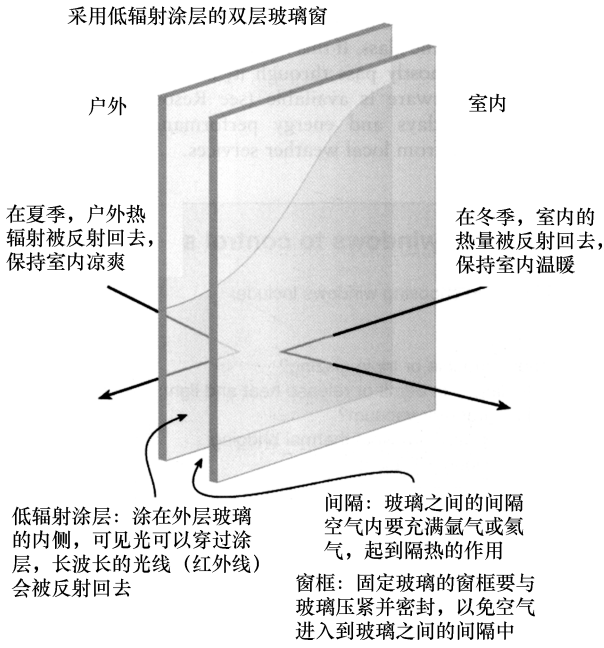


图 2.54　双层玻璃窗上低辐射（Low-E）涂层的工作原理

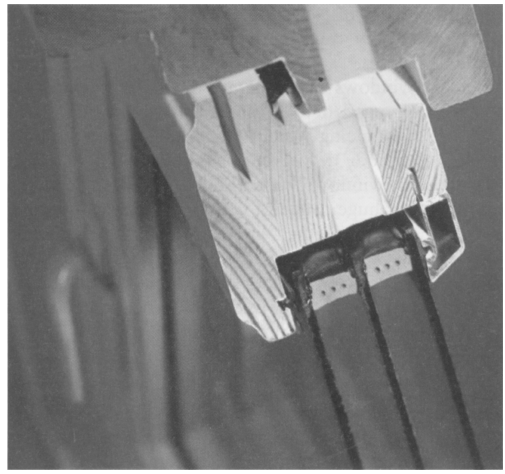


图 2.55　隔热性能良好的窗框和三层玻璃的窗户可以阻止室内的热量向外传递（资料来源：NorDan）

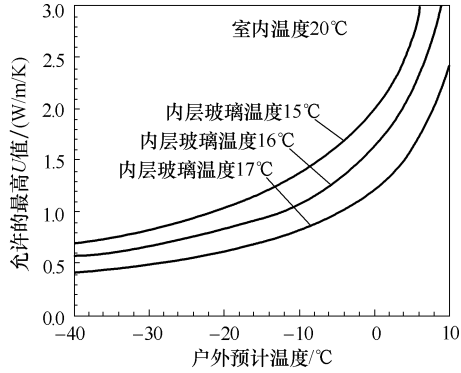


图 2.56　在不使用供暖设施的情况下，要保持室温，窗户的 U 值与户外温度以及内层玻璃表面允许的最低温度之间的关系曲线（资料来源：Harvey，2008）

（2）低辐射（Low-E）涂层

涂在窗户的外层玻璃内侧的低辐射涂层允许短波长的光线透过，而长波长（如温热的红外线）的光线被反射回室内，这有助于在室内保存日间得到的热量。

对现有窗户的一种简单快捷改装方案是在玻璃内侧粘贴特殊贴膜，贴膜后将减少热量的损失并能够解决光线过强的问题，这种塑料贴膜只允许部分太阳光线透射进入室内，而当温度高于 22℃时可以阻挡外面的热量辐射进入室内。

专栏 2.5　选择合适的玻璃窗来控制太阳能得热效果

选择窗户时需要考虑如下几个方面：

1）厚度。

2）玻璃层数——双层或三层玻璃。

3）玻璃上的涂层——增加或减少进入室内的光和热。

4）玻璃之间的填充方式——氩气或真空？

5）固定玻璃的压条的特性——避免热传递。

6）密封条的使用——密封条的有效期是多久？

7）窗框的种类。

8）窗框的材料——木质材料最理想，它可以有效阻止热传递。

9）安装以及固定方法。

专栏 2.6　位于德国法兰克福的 Terraced 公寓：通过翻修几乎达到被动式环保住宅标准

这些第二次世界大战后建成的建筑共有 60 间公寓，于 2006～2008 年间进行过翻修（见图 2.57）。翻修方案使用了 PHPP 软件来辅助完成，在翻修后 2 年内的监测结果表明，房屋节约能源标准几乎满足了被动式环保住宅的标准（Passivhaus Standard），全年热能需求仅为 17kWh/（m^2 · 年）。翻修工程包括增加了 260mm 厚的外部隔热保暖层、窗户加装三层玻璃、安装了带有热回收功能的中央通风系统、减小了热桥，并在 6 个通往崭新阁楼式公寓的楼梯间的斜顶上安装了 7.5m^2 的太阳能收集器。翻新前的气压测试表明平均空气置换率为 4.41/h，而翻新后则降为 0.461/h，这一结果从翻新前后公寓的热成像照片上可以显著地体现出来。

图 2.57　位于德国法兰克福的 Terraced 公寓
（资料来源：© IEA-SHC（Task37-540-Frankfurt））

9. 自动采光

被动式太阳能建筑的功能之一是通过增加自然采光量来减少人工照明光源的使用以减少能源的消耗（见图 2.58）。通过采取一些措施，可以减少 30% ~50% 的照明电费开支，同时还能避免室内过热等问题。

窗户允许通过的太阳光线量和太阳能热量在一年中的不同季节、一天中的不同时段而互不相同，部分原因在于太阳的照射角度即照射到窗户表面的光线与窗户平面之间的角度不同。若太阳光线与窗户表面垂直方向的角度小于 20°，大部分入射光线都可以透过窗户进入室内；若角度大于 35°，大部分光线都将被反射回去。利用一些商业软件（参见第 10 章）并参考当地气象部门提供的气候条件资料，可以理论计算出一年中需要供暖和制冷的天数及其节能性能。

当设计新建筑时，可以利用一些设计软件（THERM 和 PHPP

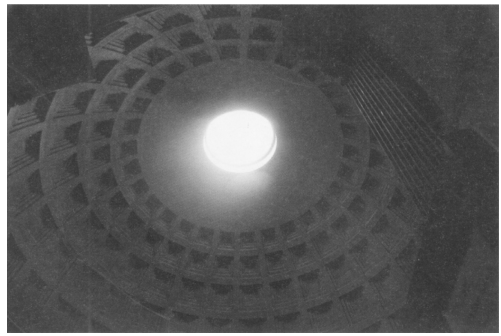


图 2.58　古代人所精通的经典采光方法：意大利罗马万神殿（the Pantheon in Rome，Italy），建筑竣工于大约公元 200 年（资料来源：© Clare Maynard）

等）来优化窗户的大小和位置以及进入室内的太阳能热量。如果是翻修一栋住宅，虽然窗户的大小和位置是固定的，但仍然有以下一些建议以便改善室内的采光效果。

1）将窗楣、窗台与窗户接合的墙面部分以及室内与窗户相对的墙面都涂上浅色的涂料，以便向室内反射更多的光线。

2）尽可能将墙面与窗户的结合区域改成斜角形状，以便使更多的光线进入室内（见图 2.59）。

图 2.59　通过采用天窗边墙倒角，使室内获取更多的光线（白色的墙面同样可以帮助反射更多光线到室内）

3）与窗户接合的墙面上安装上一些镜子，室内与窗户相对的墙面上也安装上镜子，这样，室内无法被日光直射的地方也能够获得光线。

（1）反光板

在一些场所（如办公室窗户比较高的公共区域，受平楼或者高层公寓挡光的区域等），安装反光板可以减少照明用电（见图

2.60）。反光板平行于水平面安装在窗户超过人的视线之上的位置，它可以将户外的光线反射到室内。反光板表面涂有高反射率涂层，可以将光线直接反射到天花板上，室内受光距离大约是地板到窗楣的高度的 4 倍。反光板通常用在大陆性气候地区，热带或沙漠地区不能使用反光板，以避免室内温度过高。

（2）导光管

导光管或太阳光管可以将阳光从屋顶导入到一些无法获得阳光直射的房间内（见图 2.61），例如日本人口密集的中心城区的住宅区中大量使用导光管结构。与传统的天窗结构相比，其隔热性能更好。导光管内部涂有高反射涂层，以便将光线导入到更低层的房间内（见图 2.62）。这种采光方式还有助于治疗季节性精神抑郁疾病。

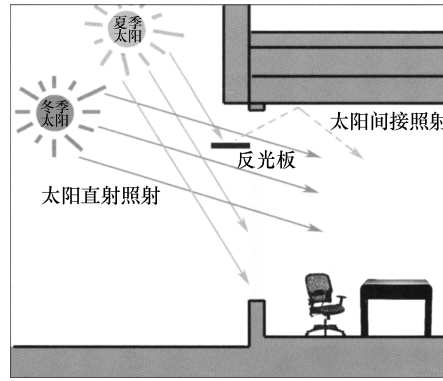
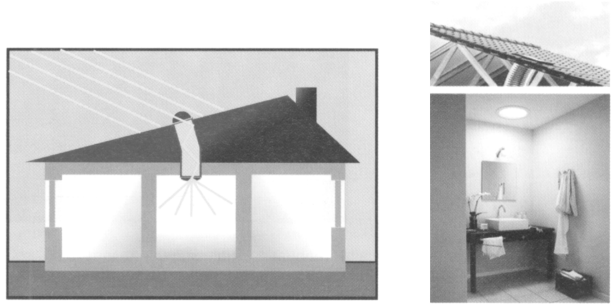


图 2.60　通过安装反光板，可将夏天太阳照射的间接光线反射到房间深处，避免刺眼的直射光

（3）安装细节

门、窗以及导光管等设施的安装都要减少缝隙，以避免热量的散失。建筑热封套的连续性十分重要，研究证明，即使很窄的缝隙也可以散失很多的热量，这一点与我们的直觉正好相反。这是由于建筑内外的气压差别有时会很大，在这种情况下，一条宽 1mm、长 2m 的缝隙与一个 0.2m^2 的圆孔的通气效果相当，从而可导致大量的热量损失。

窗户与墙面接合的部分要做内侧的隔热处理，以避免形成热桥。网络上有这方面详细的免费资料，例如英国节能信托公司的高级施工细节的网页（参见第 10 章）。



(a)　　(b)

图 2.61　屋顶安装有导光管的房屋结构示意图，导光管可以将光线导入到没有窗户的浴室内（资料来源：（a）German Wikipedia，http：//de. wikipedia. org；（b）Sun tunnel image courtesy of Greenworks and Velux）

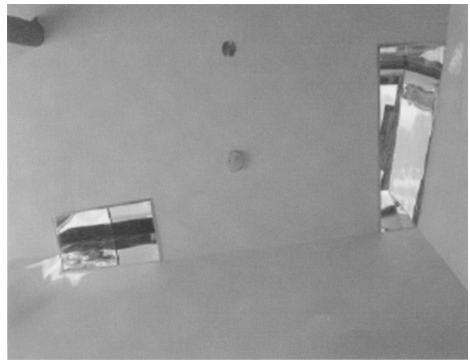


图 2.62　从屋顶导入的太阳光经内壁有反光板的导光结构导入到建筑底部的房间内

专栏 2.7　奥地利林茨的公寓街区

图 2.63 所示的公寓街区位于奥地利的林茨，这些公寓有近 50 年的历史，但状况相对良好。图片展示了其在 2006 年翻新前后的对比，翻新后，这些公寓年热能需求仅为 11 kWh/

(m^2·年)，这已经超过了被动式环保住宅的能效标准（Passivhaus Standard）。这一令人惊讶的成果一部分归功于一项创新的表面覆盖结构，设计者称之为“间隙型太阳能墙面”（Gap-Solar Facade）。这种太阳能覆盖层由一种特殊的蜂窝纤维组成，表面覆盖有玻璃保护层。覆盖层覆盖在建筑的外墙上，白天被太阳辐射加热，并在蜂窝纤维内形成热量缓冲区，这将降低室内热量的散失速度。这一系统的工作效率取决于日光照射量以及覆盖层的朝向。通过采用这种覆盖层，在采暖季节，朝南外墙的动态平均 U 值可低到大约 0.08W/(m^2K)，因此室内热量损失会显著降低。这栋建筑的其他改进措施包括安装三层玻璃的窗户并附带防眩光保护层、安装余热回收装置和空气预热装置的分散式机械通风系统。另外，公寓的阳台也用玻璃窗封闭起来，并对公寓整体结构采取高隔热保温处理，区域式供热系统为公寓内提供热水服务。

(a)

(b)

图 2.63　位于奥地利林茨的公寓街区，（a）翻修之前的照片，（b）翻修之后的照片，翻修采用了创新的太阳能覆盖层等方案（资料来源：© IEA-SHC）

参 考 文 献

Preisack, E. B., Holzer, P. and Rodleitner, H. (2002) 'Raum-klimatisierung mit Hilfe von Pflanzen', Programmlinie Haus der Zukunft des bm:vit, Neubau Biohof Achleitner, Gebäude aus Stroh & Lehm, p42

第3章

太阳能热水器

在中国有个城市拥有250万套太阳能热水（SWH）系统，该市市政府已经通过了一项新的法规要求新建的高于12层楼的建筑物必须安装太阳能热水系统，除非开发商有合法的理由拒绝执行（见图3.1）。这个城市就是昆明，位于中国西南部的云南省的省会城市。也许昆明的建筑商对于要承担安装热水器的费用颇有微词，但实际上安装费用仅为3000元，只占房屋总平均成本的0.5%，并且这些安装费用预计将在其投入使用后的3～4年内得到回收。

图3.1　中国的昆明市，该市大部分建筑物都被强制要求安装太阳能热水器（资料来源：亚历克斯·王）

昆明并不是中国唯一一个大量使用太阳能热水系统的城市，日照（中文意思为阳光普照）是一个拥有超过50万平方米太阳能热

水器的城市，这个城市中心城区 99% 的家庭都在使用太阳能热水器，而相对偏远的城镇也有超过 30% 的家庭使用太阳能热水器。

在地球另一端的日照充足的加利福尼亚州，安装了太阳能热水器的家庭同样也在享受着免费的热水。他们通过太阳能集热器来加热自家泳池的水，同时将水抽到屋顶的蓄水池中（见图 3.2）。这些水通过细小的管道流出，“这些管道与你家中的自来水管几乎是一样，当你一打开龙头，热水便会流出。”GoSolar 公司的太阳能专家格拉罕·欧文解释道。根据加利福尼亚州能源委员会的统计，该州大约有 28000 个家庭正在使用太阳能热水器，而且还有更多的家庭正在安装（NBC 2010 年报道）。加利福尼亚州能源委员会和加利福尼亚州公共事业委员会统计的数据表明，在加利福尼亚州安装一个太阳能热水系统大约需花费 5000 美元。

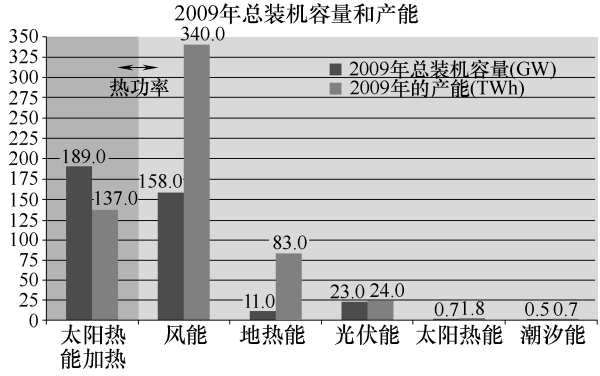


图 3.2　在满足全球能源需要方面，与其他可再生能源相比，太阳能热排名紧随燃烧木材发电与水力发电之后、处于风能发电之前，它能提供的能量比光伏电池所产生的能量更多，然而许多可再生能源促进政策都没有意识到这一点（资料来源：© IEA）

大多数人通常把太阳能板与太阳能发电联系在一起。但实际上，对于中小型规模应用，太阳能热水系统通常具有更高的效率并且更值得投资，同时其投资回报期更短。太阳能热水器是个非常成

熟的技术，事实上，用于供暖和制冷的太阳热能已经成为家庭和小型企业最能负担得起的可再生能源技术，他们也是该项技术的主要使用者。在世界范围内，太阳热能应用占太阳能可再生能源市场份额的 84%，而已安装的太阳能光伏发电仅占 14%。2007 年，全世界超过 23500 万平方米的太阳能集热器产生了超过 90000GWh 的热能，间接减少了超过 4000 万吨二氧化碳的排放。㊀

2008 年，在美国大约有 485MW_{th}的家用太阳能热水系统和 7000MW_{th}的太阳能泳池加热系统，全美所有 SWH 系统中，近 37% 安装在夏威夷，大约 20% 安装在佛罗里达，7% 安装于加利福尼亚，剩下的分别分布在其他各州。单是美国就有超过 8000 万的独户住宅，因此，SWH 和空间太阳能供暖和制冷还有极大的潜在应用市场（见图 3.3）。

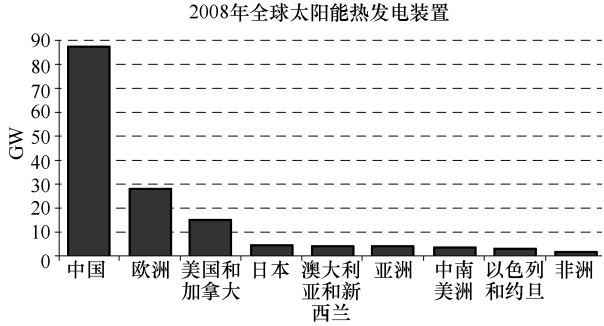


图 3.3　截至 2008 年在全球范围内太阳能集热器的总装机容量约为 151.7GW_{th}，集热器总面积约为 2.17 亿平方米，其中 131.8GW_{th}是平板型集热器与真空管集热器，18.9GW_{th}是不带玻璃的塑料管集热器，空气集热器的装机容量约为 1.2GW_{th}。中国与欧洲占了所有装机容量的 86.3%。从 2000 年开始，每年太阳能集热器的安装量基本上都保持 20% 增长速度

㊀ 数字来源于奥地利可持续技术研究院。

3.1 太阳能热水系统的发展历史

太阳能热水器是最古老以及最简单的太阳能应用技术之一。玻璃能够限制热能的能力最早是由瑞士自然科学家霍拉勒斯·德·索绪尔于18世纪发现的，他在1764年对此的描述为："这是一个众所周知的事实，该事实甚至可能已经被人们认识了很长时间，即对于一个房间、一个车厢或者任何其他空间，当太阳光通过玻璃照射到其中时，该空间的温度将升高。"为了验证该效应，德·索绪尔制造了一个半英寸的松木制长方形盒子，这个盒子经过绝热处理，顶部装有玻璃板，他把两个小盒子放在该盒子内，当这个盒子暴露于阳光下的时候，里面的小盒子温度可达109℃（见图3.4）。

图3.4 霍拉勒斯·德·索绪尔于1767年发明了第一台太阳能烤箱。该烤箱使用一个经隔热处理的箱子从顶部的三层玻璃板收集太阳能热，烤箱的最高温度可达约109℃（资料来源：维基共享资源）

19世纪时，美国的勘探者和农夫就使用一种黑色的金属罐在白天利用太阳光对罐里的水进行加热以节省燃油。接着，在1891年，克拉伦斯·坎普在马里兰州的巴尔的摩发明了世界上的第一个太阳能热水器Climax，到1900年，大约有1600台这种类型的太阳能热水器被安装在南加利福尼亚州各个家庭的屋顶上，其中大约1/3安装在帕萨迪纳市。Climax本质上是一种批量生产的加热器，它将加热器与蓄水箱结合在一起。但是到了1911年，Climax已经彻底落后了，人们研发出了许多新型的太阳能热水器，其中包括一种名为Day and Night的热水器，它是威廉·J·贝利于1909年发明并取得了专利。他巧妙地将太阳能热水器分成两个部分：加热装置处于太阳的

曝晒下，而绝热的蓄水装置被放置在较为温暖的室内。这样人们在晚上以及清晨还有经太阳能加热后的热水可用。就像现代的太阳能热水器，这种类型热水器的加热部件包括水管以及与水管相连的表面覆盖着玻璃的盒子，盒子内装有喷涂黑漆的金属薄片，使用较细的水管更有利于提高加热效率。面对这样的技术革新，坎普只得放弃销售其热水器。截至 1918 年，贝利已经卖出了超过 4000 个太阳能热水器。到了 1941 年，佛罗里达州约有半数的家庭都在使用太阳能热水器。但是为什么这样的发展势头没有持续下去呢？这里，我们又要感谢化石能源工业了：正是由于美国太平洋煤气与电力公司进行的价格战使得太阳能在美国的发展受阻，该公司提供与电网连接的电热水器，这种电热水器比太阳能热水器安装和使用都更加便利。

之后，以色列人继续对太阳能热水器进行技术革新。在 20 世纪 50 年代，也就是以色列政权建立之后，其国家经历了一场能源短缺危机，而且当时的太阳能热水器不能在晚上 10 点到第二天早上 6 点这一时间段内工作。1953 年，身为工程师与企业家的里维·伊撒发明了一种新型的太阳能热水器，并且通过他的公司 NerYah 将其投入市场。到了 1967 年，也就是著名的“六天战争”爆发的那一年，以色列国内大约有 5% 的人口使用伊撒发明的太阳能热水器（见图 3. 5）。

但在随后的岁月里，从中东开采出来的石油再一次，也许也不是最后一次地影响了人们对太阳能的需求。从伊朗引进的廉价的石油以及以色列在“六天战争”中夺取的油田使得以色列的电力价格下降，这直接导致人们对太阳能的需求大幅减少。直到 20 世纪 70 年代，由于全球能源危机，以色列通过立法要求除了塔式建筑外所有的新建建筑必须安装太阳能热水器，这是因为塔式建筑没有足够大的屋顶来安装太阳能热水器。直到今天，这个国家约有 85% 的家庭安装了太阳能热水器，它们每年大约能够为以色列节约 200 万桶的石油。同时以色列还是世界上人均利用太阳能最多的国家，太阳能占据了该国主要能源消耗的 3% 。在与其临近的塞浦路

图 3.5　以色列国内位于屋顶上的太阳能集热器（资料来源：维基共享资源）

斯岛上，太阳能热水器同样得到广泛的应用。

现在，毫无疑问，几乎所有的地方都有利用太阳能热水器技术的案例，并确立其在大多数气候条件下的应用实证。在德国，超过5%的家庭在用太阳能热水器，超过百万的设备已被安装。在英国以及欧盟其他具有相似气候的国家里，迄今为止，太阳能热水器主要用于加热独立式和半独立式住宅的生活用水。但是现在正努力将这项技术引入到公寓楼、医院、酒店和商业领域，就像在中国的昆明市和日照市，以及美国的加利福尼亚市。

3.2　太阳能热水器的工作原理

太阳能热水器的工作原理较为简单，就像将一辆汽车置于太阳底下，由于玻璃阻碍了热能从车内扩散出来，车内的空气急剧升温。另外，黑色无光泽的表面比白色的表面吸收更多的热辐射，因此，任何液体只要流经置于光照下被玻璃包裹着的黑色细管就能迅速得到加热。对于太阳能热水器，如果连接蓄水装置和加热装置的管道

以及加热器本身的绝热性能较好，它就可以保留住更多的热量。

3.3　什么是热量以及应该如何收集它

热量是对物体所含有的热能的一种度量方式，它等于其温度与质量的乘积。因此在相同温度下，质量大的物体比质量小的物体含有更多的热量，即使它们的体积一样，因为质量更大的物体密度更大。“热增益”用于表征物理由于“温室效应”收集热量的能力，也就是光滑表面透射短波辐射并反射长波辐射的能力。当短波辐射从太阳发出并到达集热器的黑色吸收板时，该辐射被吸收并且产生了热量。温室效应可通过在玻璃涂覆上“低辐射”涂层得到增强，这种涂层可防止长波辐射被玻璃底层二次折射出去。对于太阳能吸收板而言，最好的涂层是一种名为“选择性吸收表面”，也称为“黑铬”或“无波长选择性厚涂层”，简称为 TISS 的涂层，这类涂层将吸收大部分的红外辐射且具有较小的损耗。

这些收集到的热量是如何转移到蓄水箱中的水呢？答案是通过热传导和热对流。烧水过程中，锅底下的炉火通过热传导将动能传递给处于锅底部的水分子，这将使水分子的运动速度变得非常高，其能量又通过热传导传递给临近的水分子。由于水分子受热后的体积比未加热分子体积更大，受热水分子会上升到水面上，这就是所谓的热对流现象。通过热对流，温度较低的水会向下沉到锅底部代替那些上升了的热水，之后再被加热上升，该过程不断循环最终整锅水被加热至沸点。

太阳能热水器工作原理与此类似，集热器收集到的热量通过热传导传递到集热器的液体中。对于直接加热型热水器，集热器中的热水流到蓄水箱中，蓄水箱中的热水同样会上升而冷水再流回集热器，从而实现循环加热，当热水龙头打开时就会有热水流出。对于间接加热型热水器，集热器中的热介质流体（不一定是水）通过一个盘绕在蓄水箱底部的管道将热量传递给罐中的水，同样罐中的热水会上升，通过对流作用使罐中水均匀加热再流到家中的水管或

其他热水系统中。

在较为寒冷的气候地区，将集热装置与蓄水装置分开放置是十分必要的。如果工作地区还存在冰冻的可能性，那么就必须使用丙二醇作为热介质流体的间接加热型热水器，并且必须用一个水泵使得热量从集热器循环到蓄水箱中。在较温暖的环境中，就可以使用较为简单的直接加热型热水器：将蓄水箱安放在多层玻璃制的箱子内。

3.4 太阳能集热器的类型

太阳能集热器可以分为平板集热器、闷晒式集热器与真空管集热器。

3.4.1 平板集热器

平板集热器是目前最常用的一种集热器。从本质上说，这种集热器就是通过涂黑的吸收器进行热量收集，水经水管经过吸收器，吸收器朝向太阳的一面用低辐射玻璃密封，其他面用高度隔热材料密封。冷水从吸收器底部流入，热水从顶部流出（见图3.6～图3.8）。多个平板集热器可以用串联或并联方式连接使用。平板集热器有多种等级，但是大体上可以分为有玻璃涂层与无玻璃涂层两大类。

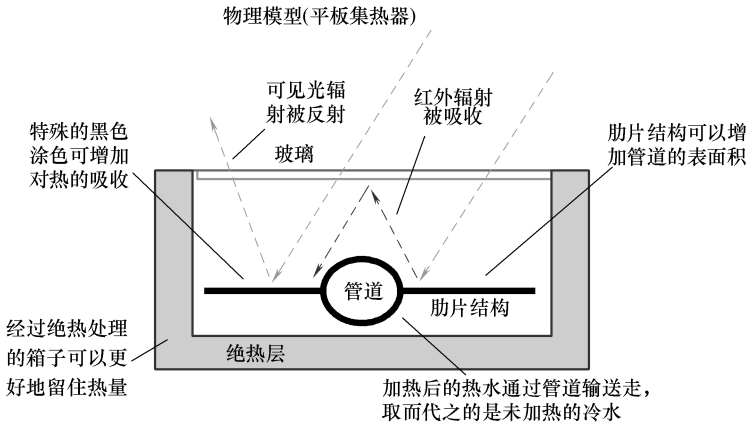


图3.6 平板太阳能集热器的工作原理

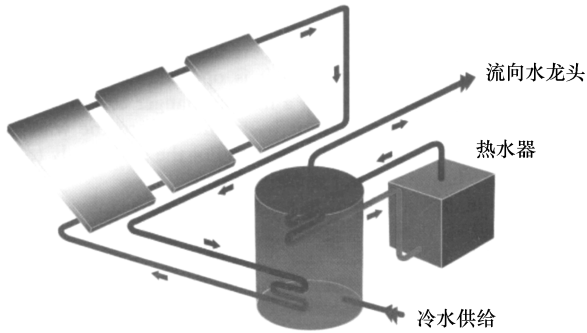


图 3.7　闭环太阳能热水系统的结构示意图。热量通过闭循环管道在集热器与水箱之间进行传输，闭循环管道中的导热介质将集热器的热量传导至水箱中的水，然后回流至集热器再次被加热。若有需要，可在水箱上部增加一个辅助加热器进一步提高水箱中的水温，辅助加热器可由燃气炉或木材燃炉等其他热源提供热量。加热后的热水从水箱顶部通过水管供用户直接使用或间接用于供暖（资料来源：节能信托基金会）

图 3.8　平板集热器的剖面图，从图中可以看到黑色的集热器底下的绝热层（资料来源：© Frank Jackson）

1. 无玻璃涂层的基本结构

无玻璃涂层的太阳能集热器通过使用较小管径的水管使得一定面积的集热器最大程度地吸收太阳能。这一类型的集热器主要分布在美国和澳大利亚（见图 3.9 ~ 图 3.11）。

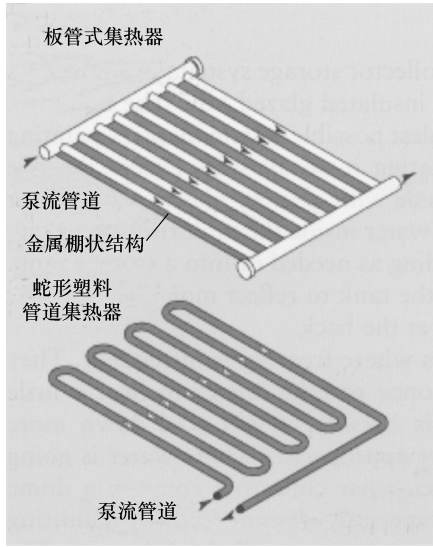


图 3.9　无玻璃的太阳能集热器通常用于泳池加热（资料来源：美国能源部）

图 3.10　墨西哥城内一个旅馆所使用的无玻璃结构的太阳能集热器

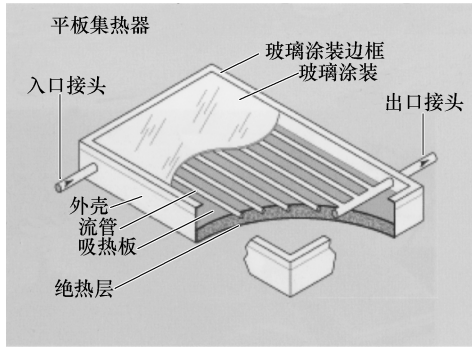


图 3.11　无玻璃层和有玻璃层平板集热器结构大体相同，不同之处在于后者带有玻璃层并且经过绝热处理。集热器管道上可加装具有粗糙的黑色涂层的肋片结构以便于吸收热量（资料来源：美国能源部）

2. 有玻璃涂层的基本结构

这一类型的集热器采用相同的结构布局，但是它增加了一个箱子、一层低辐射玻璃涂层和绝缘层（见图 3.12）。

图 3.12　位于印度班加罗尔一所学校屋顶上的一个被动式太阳能热水系统，该系统采用的是带有玻璃层的平板集热器（资料来源：http://servamatic-solarparts.com）

3.4.2 闷晒式太阳能热水器

闷晒式热水器常称为面包盒或一体化热水器，它在绝热的玻璃箱内装有一个或多个水箱或水管，水箱涂黑或 TISS 涂层。最简单的闷晒式热水器是把黑色水箱置于板条箱内，板条箱朝向太阳的一面用玻璃或塑料覆盖，其余各面均做绝热处理。冷水从水箱底部进入，水箱中经加热后的水上升至集热器顶部，随后又下流至建筑物直接使用或进入蓄热水箱中备用。也可以在水箱周围加装曲面反光镜反射更多的热量进入水箱，这种情况下只有水箱底部需要绝热处理（见图 3.13）。

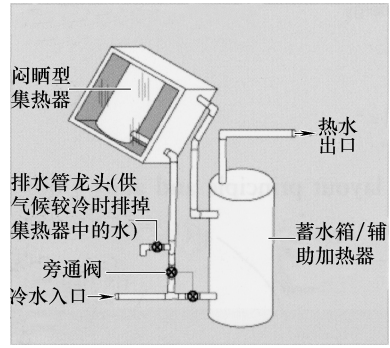


图 3.13 被动式闷晒式太阳能热水装置的示意图（资料来源：美国能源部）

闷晒式热水器适用于气候较为温和的地区（见图 3.14）。由于闷晒式加热器在加热过程中直接对整个水箱进行加热，所以在早晨即使仅为了获得一小部分热水仍需要较长的加热时间。同时由于水箱放置于屋外，所以其中水的冷却速度较快。因此，闷晒式热水器较适用于一天中较晚才需要热水的情况。现代的闷晒式热水器通常采用圆弧形的金属材料而不是玻璃作为外壳，这种金属材料经过特殊设计，既可以传导太阳能又能保温，如美国通用公司的双壁型 Lexan®太阳能热水器。圆弧形外壳和绝热底座相结合可以有效地避免风吹导致的降温。

3.4.3 真空管集热器

真空管集热器较之平板集热器更具现代感。它包含几排玻璃

图 3.14　位于加利福尼亚的闷晒式太阳能集热器
（资料来源：http：//servamaticsolarparts. com）

管，每个玻璃管内都进行真空处理，管壁表面镀上防止红外线再次辐射出玻璃管的黑色的涂层作为集热器（见图 3.15 ~ 图 3.17）。集热器表面以最佳倾斜角朝向太阳，热量传递至管道上方的歧管处，再与安装在蓄热水箱中的盘管式热量交换器进行热量循环。

真空管集热器有以下两种主要类型：

1）直流型。液体通过集热器中的管道在闭合回路中循环传输，并通过普通的热量交换器传递热量。

2）热管型。闭合回路中循环流动的导热介质在光照加热处蒸发，之后又于歧管处冷凝，它利用导热介质的相变传递热量，因此效率更高。

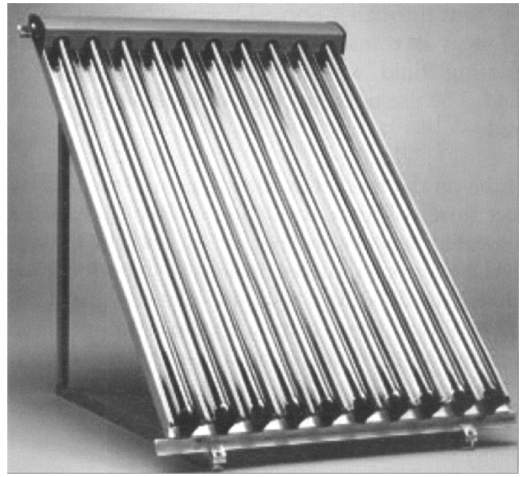


图 3.15　太阳能真空加热管（资料来源：© Bosch）

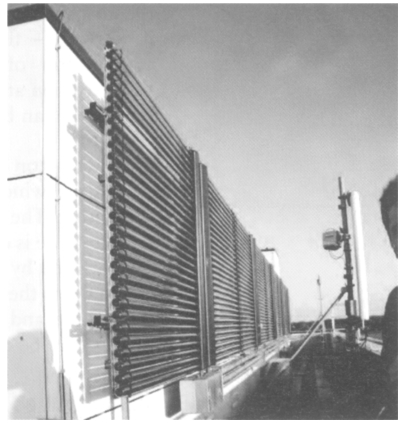


图 3.16　位于比利时维泽梅贝克有 211 套公寓的居民楼上的真空管集热器，每年可提供 6.6MWh 电量（资料来源：IEA-SHC）

图 3.17　真空管集热器的横截面示意图（资料来源：美国能源部）

当前市面上最常见的真空管是 Sydney 真空管，它含有由内外两根玻璃管融合后形成的直流型集热器，两根玻璃管之间抽成真空，内管外壁涂有太阳选择性吸收涂层。内层玻璃管内装有铜管，铜管镶嵌在圆柱形换热翅片中，热量通过铜管传导至歧管处。外部玻璃管与内部导热管没有任何湿接触，所以如果外部玻璃管损坏，则用户可以方便地对它进行替换。

选择真空管集热器还是平板集热器？

在欧洲，真空管集热器占有约 30% 的市场份额，而在除中国以外的世界其他地区，其市场份额大约为 8%。中国是真空管集热器的主要生产国和主要应用国。由于中国企业的强势市场战略，世界各地真空管集热器的使用量也在不断增加。虽然真空管集热器在理论上比平板集热器具有更高的性价比，但是在大多数情况下，两者实际使用过程中的差别并不明显，原因在于集热器的效率仅占太阳能热水系统整体效率的一小部分。对于消费者来说，真正重要的是整个系统每年所能带来的总能量值（见图 3.18）。当其他各方面条件相同时，真空管集热器在以下几种情况较具优势：

1）屋顶空间有限。

2）由于条件限制使得热水器不能朝向南边。

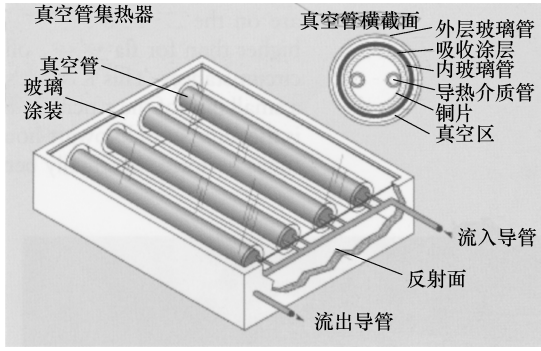


图 3.18　真空管内部抽成真空以便与外界热隔绝从而保存更多热量。鳍形结构或圆柱形结构能够增大集热器的表面面积，该表面通常与带有液体介质的管道紧密接触，这样的设计可增加固定时间周期内的热量吸收。集热器表面通常喷涂有特殊的涂层以吸收更多频率成分的热辐射。真空管集热器通常比平板型集热器具有更高的效率，这是因为真空管集热器的真空结构使其向外辐射的热量比平板型热器少得多（资料来源：美国能源部）

3）使用地位于较高的纬度。

4）太阳光直射量较少地区，如天气情况经常为多云等。

5）要求较高热量输出条件，如要求提供热水的同时提供气暖。

6）用户需要热水器能够提供较高的水温。

真空管集热器的缺点之一在于其尺寸无法做得与平板集热器一样大。这是由于它的歧管比平板集热器的歧管要大，而这将导致其导热介质的对流导热性能较差（见图 3.19）。平板集热器多数情况下适用于全年天气较为晴朗的地区，同时其价格通常较便宜。而真空管集热器则在一年中的大多数时间内都能正常工作，包括较为寒冷的月份。虽然大部分平板集热器都能通过 EN12975 标准中的冰雹损坏的测试，但是各种类型的平板集热器仍然较易受到冰雹的伤害。

图 3.19　真空管的制造（资料来源：© Bosch）

真空管集热器可以与锅炉结合使用，但需要安装额外的蓄水箱，此时有两种安装方法：一种是把蓄水池中的水注入锅炉预热；另一种是用温度传感器进行测量，当水温足够高时水流将绕过锅炉不进行预热。选择哪种方式取决于具体的锅炉类型（见图 3.20）。

图 3.20　将太阳能集热器与公寓完美地结合在一起的建筑物，该建筑物位于法国巴黎，由建筑师菲利鹏·卡尔特设计。17 个独立的太阳能热水器分别为 17 套公寓提供 40% 的热水供应量，同时这样的双层结构能够有效地保护住户的隐私且具有降噪作用（资料来源：IEA-SHC）

3.4.4 聚合物材料集热器

近年来一种新型的太阳能集热器占据了较大的市场份额。这种集热器不采用玻璃或金属材料，而是采用模压聚合物基塑料材料，这类材料有许多优点，但是同样存在不足，这些不足正逐渐通过各种新材料的研究攻关而得以解决（见图3.21）。其优点和缺点分列如下。

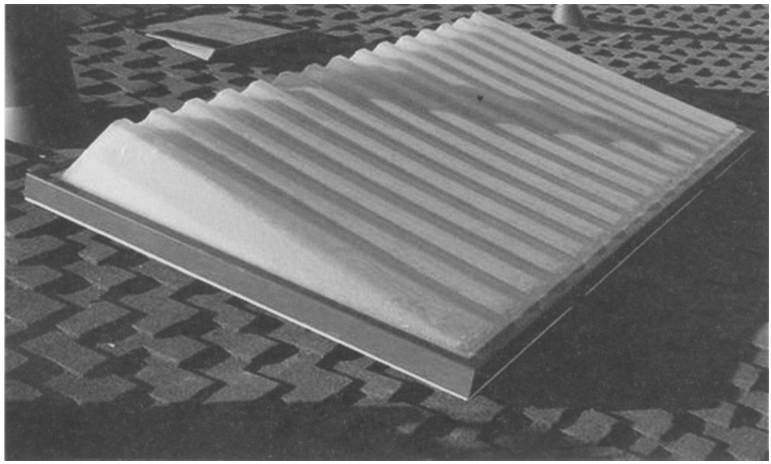


图3.21 集成了太阳能电池板的高分子太阳能集热器板，该电池用于驱动系统中的水泵（资料来源：© SolarTwin）

优点：

1）价格便宜了50%左右。

2）安装较为快速。

3）集热器的外观和颜色的选择余地较大。

4）在较温暖气候条件下，可以使用开放式、直接加热型的热水器。

5）在较温暖气候地区可使用热虹吸管型热水器。

6）不易受冰冻天气影响，因此在闭合管道内可使用水代替防

冻剂作为导热介质。

7）可采用较小的管道尺寸以及更优化的吸收层外观结构，集热器的响应速度更快、质量更轻，这意味着其效率有可能比平板集热器更高。

8）需要用到水泵时还可以用太阳能光伏电池模块供电。

不足：

长期使用时，由于受到冰冻、紫外光曝晒、长时间不用热水可能导致水在集热板内沸腾等因素的影响，这种材料较易老化，老化的速度取决于材料本身的特性以及使用的条件。

通过对材料进行的研究与改进使得上述不足在很大程度上得到改进，例如聚丙烯和交联聚丙烯的应用使得该类型集热器可工作于高纬度的地区。同样地，研究表明，聚丙烯硫化混合物在 170 ~ 180℃温度范围内能够有效抵抗高温带来的伤害。市面上常见的耐寒型集热器都能够适用于如挪威等北方国家（见图 3. 22）。

采用聚合物材料制成的没有上釉的池式吸热器已经成功使用 20 年以上。可用的聚合物材料包括聚丙烯、三元乙丙橡胶（EPDM）、带有聚酯涂层的聚氯乙烯或聚氨酯（PVC/PU）。用聚丙烯或 EPDM 材料制成的水管都会涂成和屋顶相同的红色。有一款带有聚碳酸酯涂层的产品在市场上已经连续 11 年受到好评。这里提到的大部分集热器都设计成低压太阳能热水器，其中一种集热器采用经金属板进行部分压缩的硅橡胶管，另一种回流式集热器的吸热体由 PPE 和 PS 混合材料经刚性挤压制成。

现有的聚合物材料集热器外壳包括双层聚碳酸酯板、聚碳酸酯圆壳以及丙烯酸有机玻璃等。市场上的聚合物吸收器一般与闷晒式集热器或同类的集热器结合使用，这些集热器带有 TISS 涂层，这是为了最大限度地对热辐射进行吸收，同时实验证明这类涂层具有较长的使用寿命，能够在阳光下安全使用至少 45 年。这些涂层已被开发成具有防水和防油特性，这样，与玻璃基或其他材料外壳相比，就能够在保证相同性能的前提下极大地减少外壳的保洁工作量。

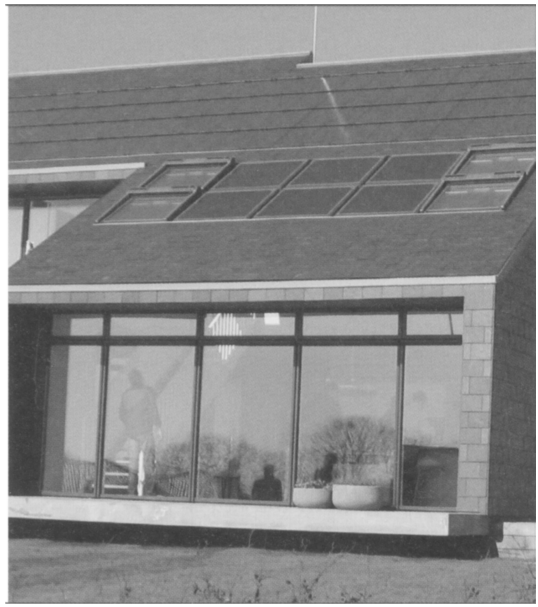


图 3.22　位于丹麦的奥尔胡斯的住宅，该住宅同时装配了被动式和主动式的太阳能热水器以及太阳能电池发电系统。6.7m^2 的太阳能集热器能够满足全年约 50% ~60% 的热水需求，同时该系统还可以为住宅提供暖气，余下 50% 的热水需求通过蒸汽泵来提供。住宅中除了卧室，其他房间都配备了地热供暖设备（资料来源：© IEA）

聚合物材料集热器有可能依靠其便宜的价格、简易的安装以及其对各种不同安装环境所表现出的较好的适应能力来改变太阳能热水器的市场格局。在对聚合物材料进行研究和开发的同时，基于聚合物材料的蓄水箱、热交换器以及光伏电池的研究与开发也在同步进行着。许多热存储系统中采用高密度的聚乙烯膜（HDPE）作为存储介质，如常见的砾石坑热水存储池。

3.5　太阳能热水系统的分类

上述介绍的几种类型的集热器可以分别与不同系统相搭配使

用。按照不同的分类方式，太阳能热水系统可以分为主动式（带有水泵驱动）和被动式（热虹吸），也可以分为间接型（闭循环热介质加热水）和直接型（直接加热用水）（见表 3.1）。其中，热虹吸系统包括水的热对流循环。

表 3.1　各种类型的太阳能热水系统

	直　接　型	间　接　型
主动式	需要水泵，直接加热用水	需要水泵，由闭循环导热介质回路加热用水
被动式	利用温差环流效应无需水泵，直接加热用水	利用温差环流效应，由闭循环导热介质回路加热用水

3.5.1　被动式系统（通常指热虹吸系统）

优点（见图 3.23）：

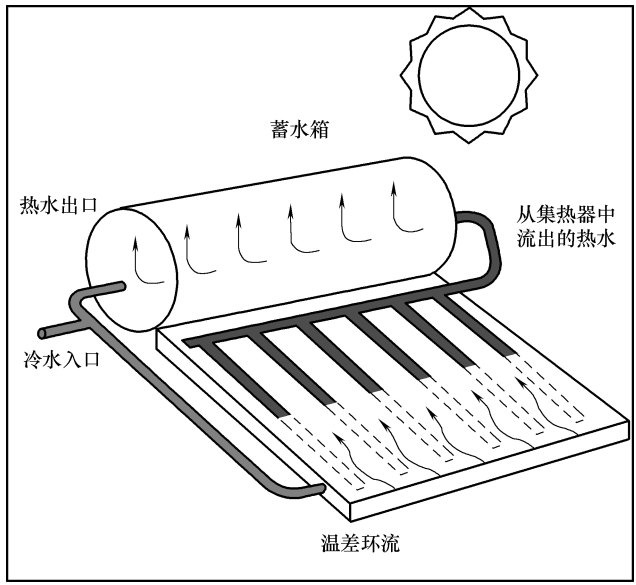


图 3.23　直接型被动式热水器的示意图（资料来源：美国能源部）

1）不需要水泵驱动。

2）故障率较低，系统较为稳定。

缺点：

1）蓄水箱必须安装于集热器的上方，否则无法产生热虹吸效应；

2）只在较温暖的气候条件下才具有较明显的热虹吸效应。

3.5.2 主动式系统

优点（见图 3.24）：

水箱可以随意安置。

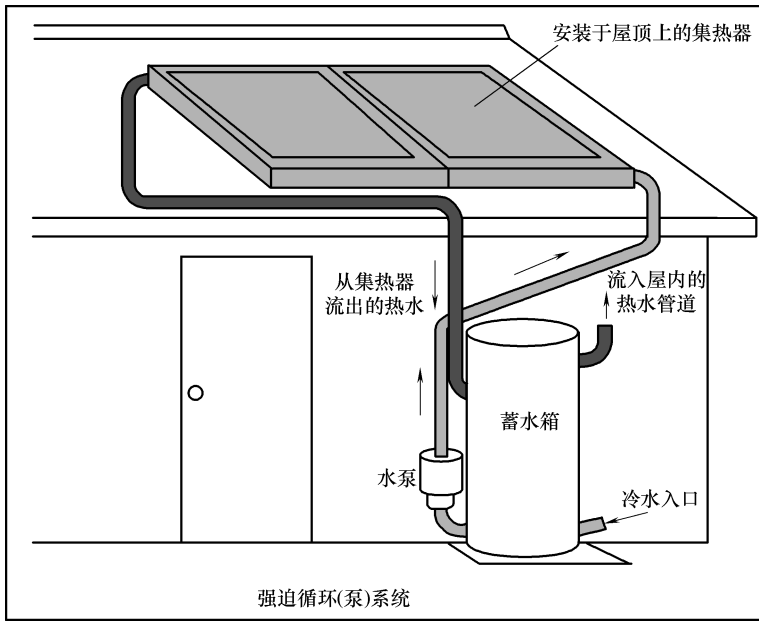


图 3.24 直接型主动式太阳能热水器的示意图（资料来源：西澳大利亚州政府）

缺点：

1）需要安装水泵及其供电线路。

2）需要安装阀门或温度控制器，这样才能保证只有集热器内水温比水箱水温更高时水泵才工作。

3.5.3　直接型系统

优点：

1）易于安装。

2）用于不会出现结冰的热带气候。

3）同样适用于游泳池加热。

4）维护成本低。

缺点：

1）不适用于可能结冰的气候条件，除非在结冰时把水排空。

2）当水箱安装于室外时热量损耗相对较高。

3）直接加热用水。

3.5.4　间接型系统

优点（见图 3.25）：

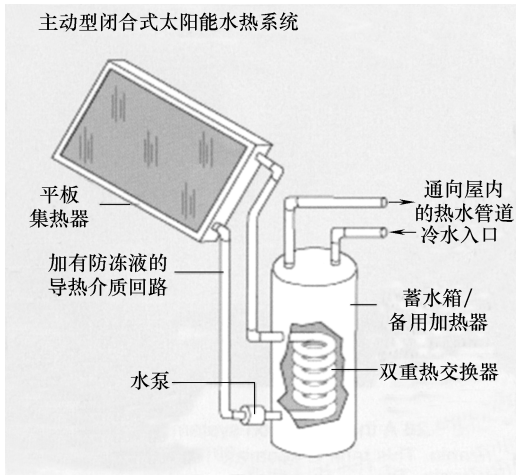


图 3.25　间接型主动式太阳能热水器的示意图
（资料来源：美国能源部）

1）能够在低于0℃的环境下工作。

2）间接加热用水，水箱可以安装于室内以减小热量的损耗。

缺点：

1）结构较为复杂，需要安装热交换器。

2）结构的复杂性将导致系统整体效率的降低。

3）导热介质必须是无毒的或者导热介质不能泄漏到用水中。

3.5.5 热虹吸系统

这是最简单的太阳能热水系统，最常用于纬度离赤道20°以内的国家，该系统要求蓄水箱直接安装在屋顶的集热器上方。在该系统中，由于蓄水箱中的热水上升而冷水下沉从而形成自然对流，这种现象称为热虹吸或温差环流，它不需要水泵，因此属于被动式（或紧凑型）太阳能热水系统（见图3.26～图3.28）。这一系统内的水箱既可以同集热器一体化安装，也可以安装在离集热器较远的屋顶内部以减少热损耗，只要保证水箱安装的位置尽量靠近并高于集热器所在高度就能保证热水能够通过对流现象从集热器上升至水箱中。

图3.26 位于留尼旺岛 Cirque de Mafate 带有水箱的一体化温差环流太阳能热水系统（资料来源：维基共享资源）

图 3.27　位于西班牙某住宅屋顶上的温差环流闷晒式太阳能热水系统（资料来源：维基共享资源）

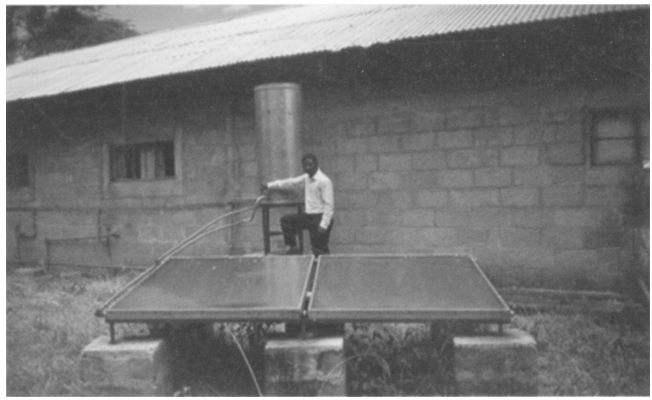


图 3.28　坦桑尼亚 Wasso 一家医院所使用的温差环流系统，该系统的水箱与集热器是分开安装的。需要注意的是，水箱位置必须高于集热器以满足温差环流效应所需要的条件，同时水箱结构必须是高而窄以使箱中水温呈现分层变化，也就是说，温度最高的水通常都在顶端以便于使用时流出（资料来源：© Frank Jackson）

该类型的太阳能热水系统通常较为持久耐用，损坏的可能性较小。19 世纪七八十年代安装于哥伦比亚的系统一直使用至今，它由当时在拉斯加韦尔塔斯公司工作的名为保罗·拉格瑞的员工对引进自以色列的最好的系统改进而成。哥伦比亚的中央抵押银行（BCH）规定该系统能用于如波哥大这样的城市，波哥大全年超过 200 天是多云或阴天天气。该系统的质保期达 25 年，安装量超过 40000 套。像波哥大这种并非每天都是晴天的城市，太阳能热水系统并不能提供人们全年所需的所有热水。在这种情况下，蓄水箱需要安装辅助加热源，如电热器或与木材燃烧火炉相连。太阳能将水加热到一定的温度，之后再通过辅助加热源加热到所需的温度。

3.5.6 直接型系统的设计

直接型系统通常安装于阳光较为充足的地区，如佛罗里达州的中心以及南部地区，该系统直接加热用水。3.7m^2 的太阳能集热器可用标准的水箱，水箱用于储存被太阳能预热过的水，同时还附带有辅助加热器，部分水箱使用浸没式电热管作为辅助加热器，但是通常情况下电热管并不会通电。在集热器的顶端装有一个通气孔，其作用是在系统第一次注水时排出管道内的空气。

主动式直接型系统可使用小型循环泵，泵的功率可小至 10W，可用 10W 的太阳能光伏发电模组供电；也可使用带有恒温控制器的交流电水泵。系统可安装一个恒温控制器，目的在于限制水箱中的水温不会超过限定值以确保系统安全。冷水从水箱底端流入之后被抽到集热器中进行加热，集热器中的热水从离水箱底部 2/3 处回流到水箱中。需要使用的热水是从水箱顶部流出，因此，水箱中的水温是分层分布的。水温的分层变化可确保已被加热的水不会回流至集热器中导致热量损失，而且还可确保自然上升到水箱的顶部、温度最高的水被使用。

3.5.7 主动式间接加热热水系统

气候较寒冷的国家经常使用主动式闭循环热水系统，该系统包括以下几个部分（见图 3.29）：

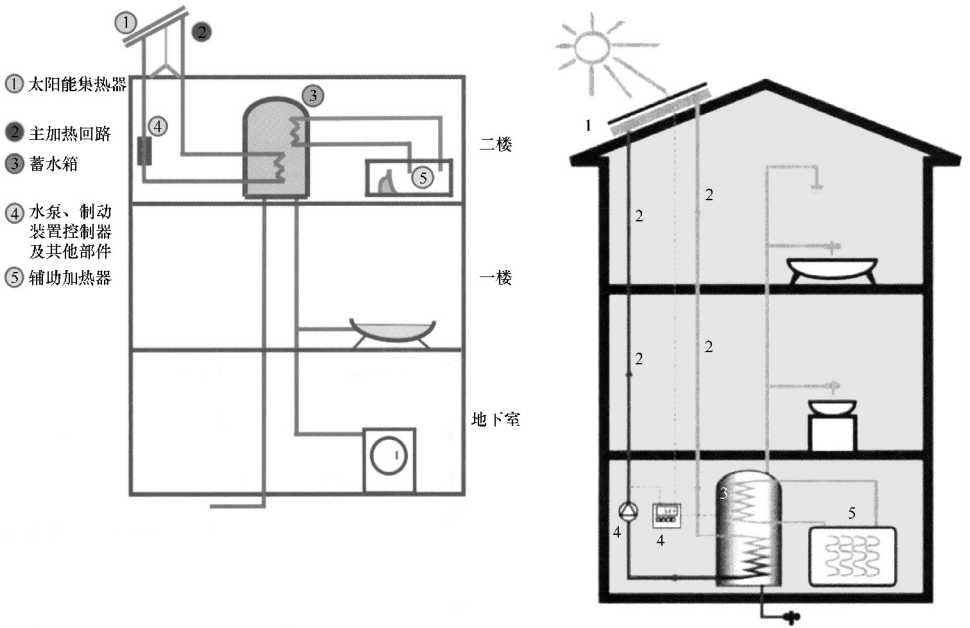


图 3.29　间接型主动式太阳能热水系统的结构示意图。由于水箱位于集热器下方，所以系统必须使用水泵。右图所示安装方法要求水泵的功率更大，因为水泵距离集热器更远、压力差更大，因此，应尽可能把水箱安装在离集热器更近且置于较高的位置，如右图所示。这样可以利用重力作用使水箱中的热水自动流到使用位置上。之所以称这样的系统为“闭循环”是因为导热介质把热量传递给水箱中的水之后会重新回到集热器中并再次被加热（资料来源：节能信托基金）

1）集热器：吸收太阳能热量，热量再经传导导热给导热介质。常用的导热介质为掺有防冻剂（通常为丙二醇）的水（丙二醇与一般交通工具中使用的防冻剂乙二醇不同，它是无毒的）。

2）主导热介质回路：将被加热后的导热介质输送至蓄水箱中的热交换器，水箱中的水吸收热交换器中的热量，此时热交换器中的导热介质温度下降经主导热介质回路再次回到集热器中准备进行下一加热—冷却循环。

3）蓄水箱：用于储存加热后的水，外壁需进行隔热处理。

4）控制器：控制水泵只有在集热器温度高于水箱温度的情况下才工作，这是为了避免晚间时水泵将热量从水箱泵回流至集热器。集热器和水箱间接入一个单向阀，也同样可以避免由于两者温度差产生的虹吸现象。

5）辅助加热器：必要时可用燃气锅炉、生物质燃料锅炉或电热管对水箱中的水进行辅助加热使其温度达到使用要求。

在一些国家，主导热介质回路常有两种设计方法：全封闭式和回流式。

1. 全封闭式系统

全封闭式系统必须带有一个膨胀箱以吸收导热介质受热产生的膨胀，与膨胀箱连接的管道必须呈波浪形安装、长度足够以使得导热介质被加热后，管道中的空气能得到释放，而冷却后，导热介质能回流。安装于水泵之后、膨胀箱和集热器之前的单向阀可避免夜间可能产生的热量损失（见图 3. 30 ~ 图 3. 32）。

2. 回流式系统

回流式系统的导热介质内含有空气，导热介质的膨胀被容纳在带有气囊的回流箱内（见图 3. 33 和图 3. 34）。热量的流失可以通过关闭水泵来避免，因为关闭水泵意味着此时导热介质将会在循环过程中通过虹吸过程从集热器回流至回流箱中。回流系统的水泵功率要大于全封闭式系统。

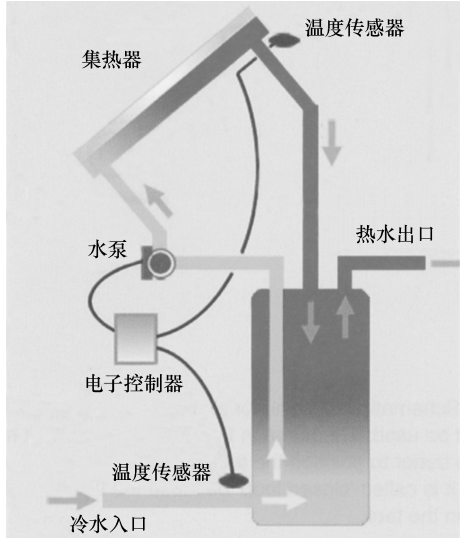


图 3.30　专门为无结冰地区设计的直接型太阳能热水系统。控制器读取并比较两个温度传感器的读数，当集热器水温较高时控制器就会自动启动水泵

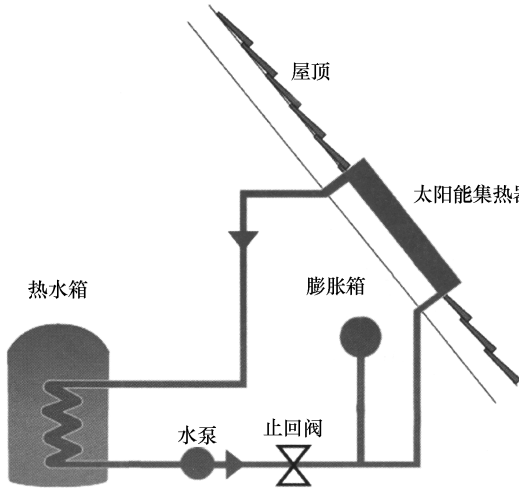


图 3.31　间接型封闭式太阳能热系统的结构示意图。系统中带有一个膨胀箱用于吸收导热介质升温时发生的热膨胀

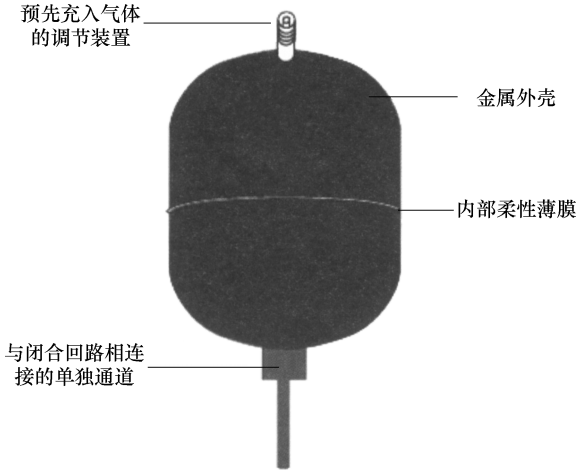


图 3.32　间接型封闭式太阳能热系统中的膨胀箱的结构示意图。该膨胀箱未做绝热处理，这是因为当导热介质受热膨胀进入其中后，要求它能在最短的时间内冷却下来

回流系统相比于全封闭式系统主要具有两个优点：

1）回流系统可以有效避免过热带来的危险，这是由于集热器过热时，水泵会自动关闭，而此时导热介质将会从集热器回流至回流箱中。

2）回流系统不受结冰的影响，这同样是由于当集热器温度太低时，水泵会自动关闭。

液态乙二醇重复过热将会导致其发生化学分解并产生残渣，这些残渣将迅速阻塞管道使系统不能正常工作。可用液态丙烷替代乙二醇作为导热介质，但丙烷的长期使用可能会腐蚀塑料垫片。

3.5.8　选择合适的系统

对于小型或家用太阳能热水器，选择使用哪种系统时需要考虑以下主要问题：

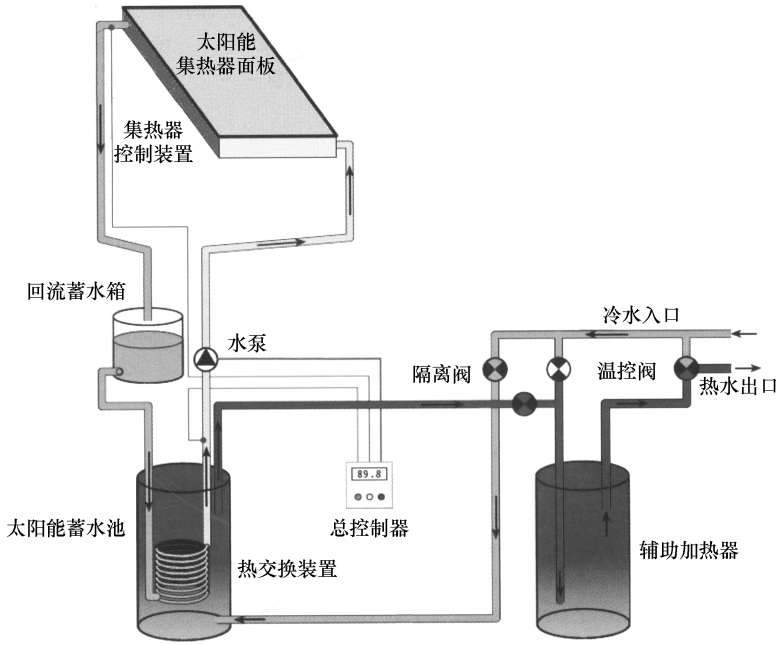


图 3.33　回流型封闭式太阳能热系统的结构示意图。封闭回路中含有气体，当水泵不工作时水会回流至回流箱中

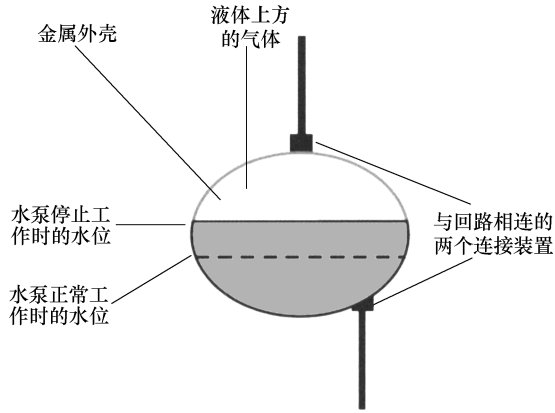


图 3.34　回流式太阳能热系统中的回流箱的结构示意图。由于是加热回路的一部分并且温度较高，回流箱必须进行绝热处理

1）有多少未被遮蔽的朝阳方向的屋顶面积是可用的？（南半球的朝北方向或北半球的朝南方向）。

2）现有的太阳能热水系统的特性（如有些太阳能热水器无法使用辅助加热器）。

3）安装预算额。

已安装的太阳能热水器的热水管道需要进行较好的绝热处理，所使用的淋浴喷头、洗衣机以及洗碗机的能效等级尽可能高，以最大限度地减少对热水的需求，减少能量的需求比提高可再生能源能效所花费的投资额要少得多。若太阳能热水器还要用于供暖，请详细阅读第 4 章。

集热器可以安装在赤道以东或以西 30°范围内，即位于安装位置的纬度加减 15°范围内（真空管集热器比平板集热器允许的角度偏移量更大）。举个例子，假设安装位置的纬度为 20°，则允许安装角度为 5°～35°（见图 3.35）。理想情况下，安装太阳能热水系统的位置从早上 9 点到下午 3 点太阳光不被遮住。若屋顶不是正面

图 3.35　位于英国某住宅上的平板集热器（资料来源：节能信托基金）

朝向赤道，则必须加大太阳能集热器的面积。同样地，若集热器部分（如 10% 面积）在一天中或一年中某些时段不可避免地会出现阴影，此时也应加大集热器的面积。集热器与水箱之间的距离应尽可能短，以减少热量的损耗，系统所使用的管道都必须进行严密的绝热处理并保证绝热层没有缝隙或损坏。

3.6　集热器大小

若安装的位置距离赤道较远或者当地为多云天气，为获得等量的热量，需要增大集热器的面积。例如，在热带地区，人均需要的集热器面积约为 $1m^2$，而在纬度 50° ~ 60° 之间的地区该值则为 2.5 ~ $3m^2$。再如，一个四口之家每年用于加热热水所需的总能量略小于 5000kWh，而在像加拿大这样气候条件下，一个维护良好的普通的平板集热器每年每平方米能够产生大约 400kWh 的能量。由于一个家庭整年的热水需求量基本保持不变，因此很容易估算出太阳能热水器的尺寸。将安装位置的纬度、经度、光线的入射角以及屋顶的朝向等相关参数输入到免费的软件就可以估算出该位置可获得的太阳能量，再根据该能量值计算出集热器面积以及蓄水箱的容量，这种计算软件相关资料请参阅第 10 章。表 3.2 给出了集热器面积的粗略估计值（未考虑光线入射角以及云层覆盖情况）。

表 3.2　每人每天需要 75L 热水条件下集热器面积与纬度的关系

纬　　度	每人的集热器面积/(m^2/ft^2)
0°	0.5/5.5
20°	0.75/8
30°	1/11
35°	1.3/14
40°	2/22
50°	2.5/27.5
60°	3/33

根据表3.2，位于美国亚利桑那州（纬度约为30°）的一个四口家庭需要约4m^{2}的太阳能集热器，而位于瑞典（纬度约为55°）的同样规模家庭则需要约11m^{2}的。

热能储存

通常情况下，300L（80gal）的热水储存对于一个四口之家已经足够了。水箱的容积也可以利用集热器的面积进行估算，通常每平方米太阳能集热器面板对应50～100L（15～25gal）的水箱容积，实际容积要根据当地的具体光照情况选定。因此，例如对于一个5m^{2}的集热器面板的太阳能热水器，所需的水箱容积约为300～375L。

热量被集热器收集的同时也在不断地流失，因为根据热力学第二定律，热量总是从温度高的地方传递到温度低的地方。热量传递的速度跟水箱顶部热水与热水相接触的水箱内壁以及水箱底部冷水之间的温度差有关，同时也与水箱内部的热对流能力有关，可以通过限制上述条件来减少热量的流失。第一步也是最简单的一步是对水箱采取尽可能好的绝热处理。第二步是根据可用的安装空间、预算以及气候条件等相关采取相应的措施，下面将就此进行讨论。第三步：影响热对流的因素在于电加热管、输出与输入管道的位置，以及这些位置的水温，控制这些因素的系统称为分层装置。

1. 炎热气候

若太阳能热水器只有一个水箱，则在阳光明媚的天气条件下，水箱内的水以及集热器内导热介质液体的温度将很快接近其最高温度，之后温度无法再升高。若集热器中导热介质的温度为82℃，而集热器面板温度为93℃，则两者之间基本上没有热量传递，这意味着在此情况下可获得的实际热量将低于预期的4kWh。那么，能否通过增大水箱的体积来避免上述情况的发生？但这样做又会导致在其他时间段水箱内的水无法被充分加热，在此情况下，水箱内不同高度的水将存在温度差，温度最高的水在顶部而温度最低的水在底部，水箱内的水将产生热对流使得水温不断下降。因此，若水箱的尺寸大于集热器面积对应的值，则集热器的效率将下降。但是

如果水箱太小，那么集热器收集的部分热量又将被浪费掉。因此，水箱的规格应在一年中尽可能多的时间内与集热器的规格相匹配才能最大程度地减少热量的浪费。在大多数情况下，增加水箱的数量有助于收集更多的热量。

假设使用 2 个甚至 3 个绝热性良好的顺序串联的水箱，闭循环导热介质从集热器连接到这些水箱中，这样热量将会按序对这些水箱中的水加热（见图 3. 36）。在此情况下，与集热器连接的第一个水箱的水温将是最高的，因为它最先得到集热器传递过来的热量；第二个水箱将得到由第一个水箱所传递的热量；第三个水箱将收集到剩下的最后一点热量。温度已降低的导热介质重新流回集热器以

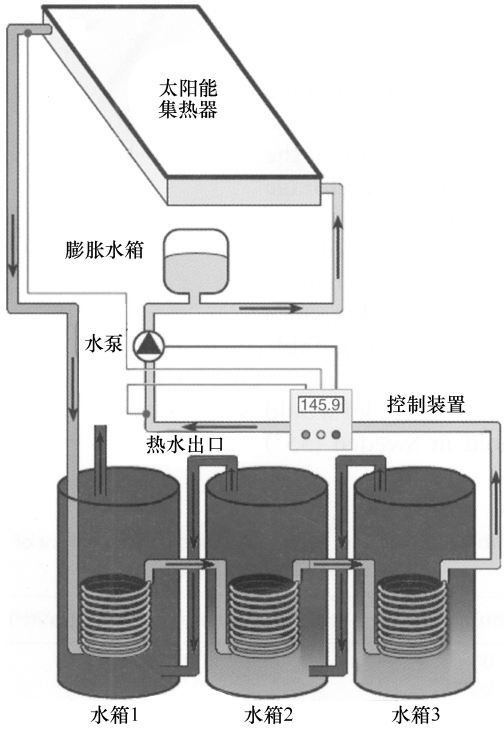


图 3. 36　多个隔热良好的水箱串联使用可增加集热器的热量输出，图中例子使用三个水箱

获得热量并再次循环。在这种排列方式下水箱 1 中的水温将率先达到最大值，接着其余热量都将被水箱 2 所吸收直到水箱 2 达到最高温。这个系统的关键之处在于水箱 1 中的热水不会将热量传递给相邻的冷水，而使用容积较大的单一水箱则会存在这种现象。若系统带有辅助加热器，则水箱 3 中经过预热的水可以流入水箱 2，再流入水箱 1，最终从水箱 1 顶部流到使用终端。

2. 温和以及寒冷的气候

在较为温和、寒冷的气候条件下使用封闭式间接型太阳能热水系统时，如果新设计或经改进后的房间没有足够的空间安装三水箱系统，则可以选择有双加热回路的蓄水罐或蓄水箱。市面上有各种各样不同设计的水箱，虽然其构造的复杂程度不同，但都是为了保证系统具有最高的效率。图 3.37 中所示的水箱底部附近装有与集热器连接的热交换器，它与太阳能集热器构成一个加热回路。其作用是预热水箱中的水使其升温。在水箱的上半部分还装有另一个加热回路，该加热回路可以用电能、汽油或生物能驱动。该加热回路由水箱内的温控仪控制，太阳能产生的热量不足以加热水到所需的温度时，温控仪控制接通该加热回路为水箱中的水提供辅助加热。图 3.38 所示为一个更为复杂的水箱，这个水箱带有控制热量和水

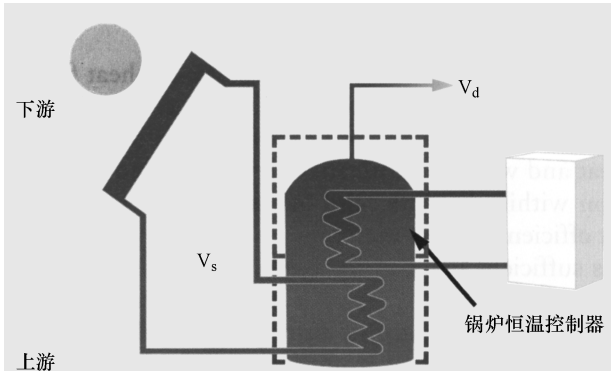


图 3.37　基本的双加热回路、单水箱的间接型封闭式太阳能热水器（资料来源：英国 Wagner Solar 公司）

的输入与输出分隔装置。分隔装置有助于减小水箱内的水由于热对流效应产生的移动，图中的分隔装置包括挡板和分隔室，这类水箱是效率最高的水箱之一（见图 3.39）。

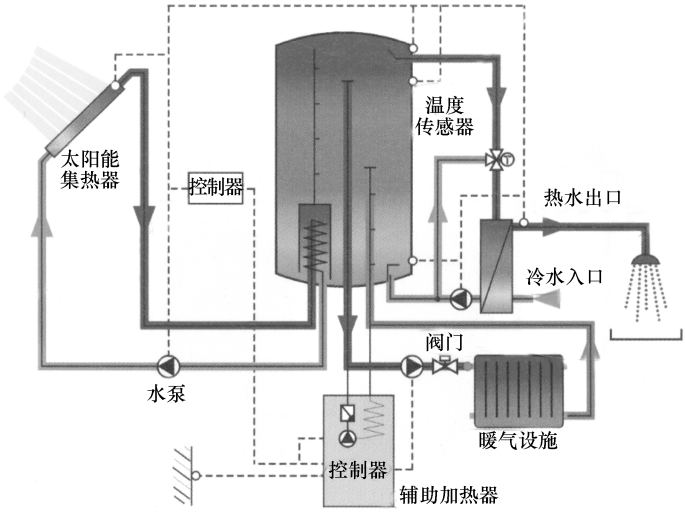


图 3.38　另一种双加热回路、单水箱的间接型密封式太阳能热水器，但这种热水器带有分层装置。从图中可以看出，热水从水箱较高位置取出，而供暖用热水则从较低的位置取出然后流回更低处。水箱中的温度传感器能够探测水箱中不同出水口的温度从而进行加热、排水、注水等各项操作，使得系统保持较高的工作效率

若建筑物有足够的空间，那么就可以使用 2 个甚至 2 个以上的水箱，如图 3.40 所示。图中第一个水箱是缓冲水箱，其作用是储存更多经太阳能加热的热水。这些热水再进入主水箱待用，主水箱带有辅助加热器，该水箱内的水只需要较少的加热功率就能达到所需的温度。还有一种设计是在一个储热装置内安放一个家用水箱，换句话说，就是水箱内嵌另一个水箱，这结构适用于空间较小的情况（见图 3.41）。

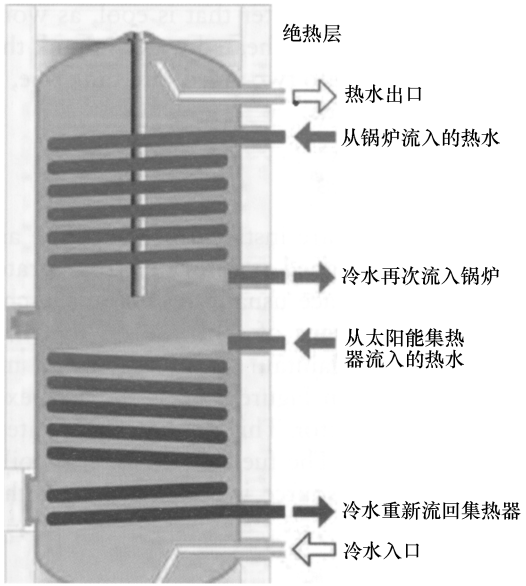


图 3.39　不带温度传感器的分层装置的简单结构图

如果家庭中已经有混合动力锅炉、单个或多个电加热器，那么这些辅助加热器或锅炉就能直接由太阳能蓄水池供水，就像由水龙头供水一样。也就是说，只要家庭中有使用热水，由太阳能热水器预热过的水就能补充到锅炉中，这样就可以节省锅炉的能源消耗。但是能否这样做还要听取专家的建议，因为只有一小部分锅炉允许使用预热过的水，同时系统还需要装有温控器以避免水温过高损伤锅炉。

3.7　可能存在的风险

当水温超过 80℃时会导致剧烈的灼烧，严重者可能会致死。因此，为避免烫伤，太阳能热水系统必须装有温控混合阀门，需要热水时，冷水经混合阀门与太阳能热水器中的热水混合，以保证出水口的水温不超过 60℃，并且需要安装配套的可控安全控制装置。同样，用户应该预防系统中水垢的产生，高温条件下更易产生水

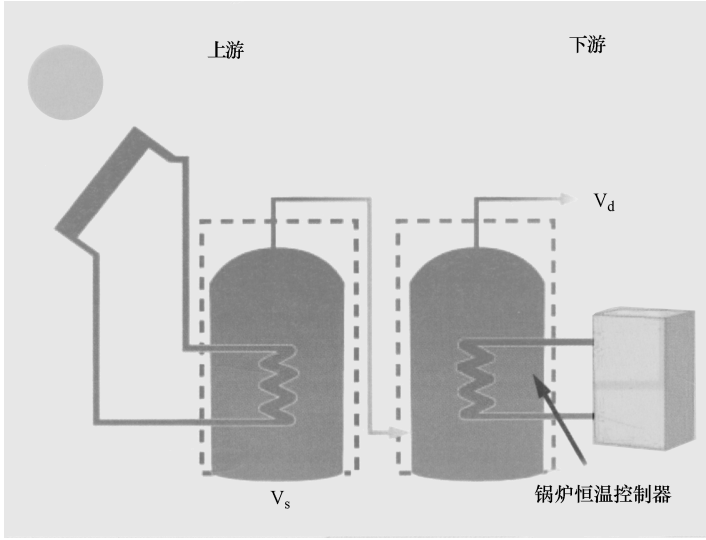


图 3.40　间接型封闭式的双水箱太阳热水器示意图。经太阳能加热后的热水首先储存在起缓冲作用的第一个水箱中，随后热水会流向第二个水箱，在需要的情况下第二个水箱可以安装辅助加热装置（资料来源：英国 Wagner Solar 公司）

垢，它最终将会导致堵塞。

另外一个潜在的危险是蓄水池中的细菌，这可以通过下列措施来避免：

1）控制预热水的量低于日常所使的水量的 2 倍。

2）使用间接加热主回路。

3）通过温控器将水温控制在 60℃。

4）尽量缩短未进行隔热处理的次级管道的长度。

3.8　水泵和控制器

闷晒式热水系统不需要水泵和控制器，该系统中水被加热后形成压力差或热虹吸现象自动流动。但在大多数情况下系统都需要一个绝缘阀，目的是使集热器在其进行维护时能够与水箱断开，同时

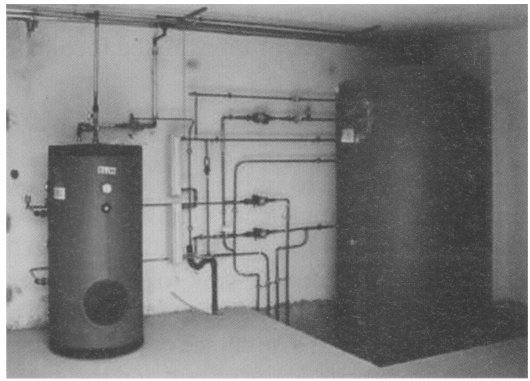


图 3.41　图示两个水箱是可提供热水和暖气的双功能太阳能热水器的一部分。左边水箱储存直接使用的热水，而右边的水箱中的水温较低，主要用于房间供暖，系统的控制装置会将热水供应的优先级设为更高。同时系统还可以配备一个辅助加热装置以加热其中一个或两个水箱。不过这种设计还需要进一步改进，因为它的效率并不是最高的（资料来源：© IEA）

还可以使用辅助加热器对水箱中的水加热以保证热水供应。

水泵在主动式系统中较为常见。正确选择水泵是十分关键的，其功率应与系统的尺寸以及集热器与水箱之间的距离和高度差相匹配。直流水泵可以通过直流太阳能电池来驱动，而交流水泵可以直接通过墙壁插座供电，通常水泵可以持续使用 20 年左右。为了保证水泵的工作效率，其功率可选定为不高于集热器峰值热功率的 2%，这也是市面上专门为太阳能热水系统设计的水泵的功率一般在 10 ~ 30W 或更小的原因。

水泵以及整个系统都由一个微分恒温（或者温度）控制器进行调控。控制器读取安装在集热器和水箱上的温度传感器的数值并进行比较，它可以精确地调节水泵的开关时间，并且可以显示系统运行状态和故障检测结果，控制器还需要有一个手动/自动控制切换开关。主系统同时还需要一个压力计来检测系统的压力以防止泄

气的发生，太阳能热水系统中很多故障是很难被发现的，这是因为出现故障时辅助加热器会自动对水箱的水加热，但此时系统的运行效率非常低。

3.9　太阳能热水系统的安装

通常希望一个太阳能热水系统能够被安装在一个高能效的建筑物上，这就要求建筑物不管在什么样的气候条件下都具有较好的绝热性与气密性。连接集热器的管道一般都安装在墙壁内部，因此必须使用防水板以及绝热胶带来对一些孔洞进行密封以防止漏气或漏水。在一些结构中还可能存在冷凝的风险（建筑物构造层之间），主要原因是潮湿的热气与回流至集热器温度较低的管道相遇，热气在管道上冷凝之后形成水滴会滴入木质结构并导致其腐烂，所以必须在不影响系统功能的前提下防止潮湿的热气到达这些温度较低的管道。

3.9.1　集热器的装配

集热器可安装在屋顶、空地或遮阳棚上。屋顶上的集热器有时安装在与屋顶平行并比屋顶稍高的构架上（见图 3.42）。安装在空地上的集热器必须足够坚固以防被洪水冲走，并且能够方便地调节角度使其具有最佳的朝向。在屋顶空间不足的情况下，一般将集热器安装在遮阳棚上，并且要求集热器与遮阳棚以适当的角度贴近安装。

在角度与朝向都适合的情况下，将集热器安装于屋顶是最经济的选择。在装配的过程中，必须考虑屋顶的负荷能力以及安装位置是否会遭受强风和雨雪影响等具体情况。当太阳能热水系统的质量较大时，将其安装在地面是一个较好的选择，但是此时必须考虑集热器被遮挡的问题。

图 3.42　培训课中将太阳能集热器模拟安装在屋顶（资料来源：©克里斯·拉夫通）

3.9.2　设备维护

大部分较为专业的太阳能热水器可以保证十年的使用寿命，除了需要偶尔对集热器进行清洁外，它们仅需要较少的设备维护。请专业人员进行每年一次的例行检查以及 3～5 年一次的详细检查对于这类设备的维护来说已经足够了。

3.9.3　系统的预期效果

在温带和亚寒带，上述系统可保证在夏季能够提供充足的热水供应，而到了冬季大多数热水需要由其他辅助热源，如燃烧汽油、石油、生物能等加热设备提供。从整体而言，在中纬度地区太阳能热水系统可提供全年 60% 的热水供应，而在高纬度地区其所能提供的热水约为 40%（取决于集热器的面积和系统的效率），在赤道

附近，系统几乎能提供全年所需的全部热水。

在一个典型的温带的夏季白天，集热器中的液体温度能够达到80℃，在暖和多云的天气可达到 20 ~ 30℃，而在阴冷多云的天气一般只能达到 10 ~ 15℃。但是只要集热器中的温度高于流入的冷水温度（一般为 10℃），那么太阳能热水器就可以节省能源。

3.10　水暖气暖双系统

一些公司生产能够提供热水和房间供暖的两用太阳能热水器，这种系统的集热器必须具有较大的面积，它可在春季和秋季辅助其他燃油供暖设备为室内提供暖气（见图 3.43）。取决于建筑物的绝热水平和所处的位置，太阳能热水系统一般能够提供所需供热量的 20% ~30%。如果与被动式太阳能建筑结合使用，那么系统有可能能够满足全部的供暖需求。

(a)

图 3.43　安装于柏林建筑物屋顶上的平板集热器和真空管集热器，其中真空管集热器安装在一栋政府大楼的屋顶上（资料来源：©（a）BSW-Solar/Langrock，（b）BSW-Solar/Upmann）

(b)

图 3.43　安装于柏林建筑物屋顶上的平板集热器和真空管集热器，其中真空管集热器安装在一栋政府大楼的屋顶上（资料来源：©（a）BSW-Solar/Langrock，（b）BSW-Solar/Upmann）（续）

更详细的信息可参阅本书第 4 章。

3.11　太阳能电热收集系统

在市面上出现了一些新式的混合动力型集热器，这类集热器能够利用太阳能同时通过太阳能电池板供应电力和通过集热器产生热水，这种系统称为 PV/T。详见本书 6.2.1 节。

3.12　涓流式太阳能集热器

涓流式太阳能集热器与传统意义上的集热器完全不同，它是由哈利·E·汤普森于 19 世纪 50 年代发明的（见图 3.44）。其基本工作原理很简单：集热器由黑色的波纹状金属（铝）构成，集热器表面覆盖着玻璃，金属的背面是经过绝热处理的。水在流经波纹状金属上槽状结构的时候被直接加热，之后从集热器底部流入蓄水

箱待用。由于水是被直接加热的，所以系统的效率一般在 60% 左右，这是一种可由用户自行安装的系统，同时具备价格便宜、安装简单的优点。

图 3.44　带有由太阳能电池驱动的水泵的涓流式太阳能集热器（资料来源：©约翰·肯尼文）

这类系统在阳光充足的区域备受青睐。系统自研发以来不断得到改进，并开发了能够适应高纬度地区的产品。约翰·J·坎伊万率先使用黑色的聚酯金属来代替之前使用的波纹状金属，这类聚酯金属能够令水呈涓流状流下，这样有利于水吸收到更多热量。与使用易碎且厚重的玻璃不同，新系统表面采用聚碳酸酯材料覆盖，其内表面涂有聚丙烯薄膜以减少热量的流失。当然，涂有低辐射涂层的玻璃材料仍经常被使用。

该系统也需要水泵帮助水进行循环。当水泵关闭时，水就会回流至蓄水池中。系统的相关装置能够在网上买到（具体参见约翰·J·坎伊万自行出版的《MTD Solar Heating》一书，2007 年，美国）。

优点：

1）避免了系统内潜在的高压对系统造成的危害。

2）系统不会发生气阻现象。

3）集热器几乎一半黑色表面面积直接与水接触从而增加了热量的传递，一些新型的塑封设计太阳能集热器也同样具有这一优点。

4）系统安装较为简单。

5）测试与调试过程同样较为简单。

3.13 太阳能泳池加热系统

对于那些能够拥有自己的室外泳池或者室外休闲浴场的人来说，太阳能加热系统是一种具有较高性价比的加热方式。通常情况下，流经集热器的热水管道直接与泳池的过滤系统相连接而起到直接加热泳池的作用。

一个泳池需要多大面积的集热器呢？大体而言，在温热带地区，所需的集热器面积约为泳池的一半，而且集热器必须靠近泳池并朝向赤道方向（见图3.45）。而在像加拿大或斯堪的纳维亚这类国家的气候条件下（在这类天气下结冰现象时常发生），所需集热器面积基本要与泳池面积相同。而在像加利福尼亚地区的气候条件下，集热器面积为泳池面积的1/4～1/3就已足够了。

市面上有各种材质的集热器，其中较为常见的一种是采用PDM（phenylenedimaleimide，苯二马来酰亚胺——译者注）级的PVC吸热器，但是这种材料在是否环保的问题上存在很大的争议，一些公司同时还提供简易的装配工具。对于小型泳池，可以使用黑色塑料制作的集热器，这种集热器不用时可以将其卷折起来，在集热器边缘有可与泳池过滤装置相连接的管道。传统的太阳能面板也同样适用于加热泳池，但大多数情况下太阳能热水器都需要经过改进以使其能在一年中阳光不是那么充足的天气也能为泳池加热。

若泳池的绝热性能较好并且不用时用绝热材料覆盖其表面，那

图 3.45　游泳池的水由安装于屋顶的太阳能热水器加热，集热器的面积约为泳池面积的一半（资料来源：© UMA Solar）

么所需集热器的面积就可以有所减小。泳池上的覆盖物还可以起到防止落叶与灰尘等杂物落入泳池的作用。假如覆盖物是黑色的，那么它在白天还能帮助系统吸收到更多的热量。一般的家用排水管在这类系统或其他带有水泵的系统中是不适用的，这是因为这类排水管不能承受由水泵产生的水压。一般的家用太阳能泳池集热器都被设计成能够承受 1.5bar⊖的压强；而泳池的过滤系统一般能承受 ±1bar的压强。不锈钢水管也不适用于一般的泳池中，因为水中含有的氯气会腐蚀这类管道。

3.14　太阳能制冷

同人们的直觉相反，实际上太阳能热水器还能用于提供冷水和

⊖　$1bar = 10^5 Pa$。——编辑注

制冷。目前世界上有成千上百万的空调正在被人们使用，而美国与亚洲市场的使用增长率最高。全球对于加热、通风以及空调系统的需求正以每年 6% 的速度增长，到 2014 年其市场份额将会达到 880 亿美元。甚至在加拿大这样寒冷气候的国家，仍然有 38% 的家庭拥有空调器，并且大部分集中在安大略湖附近。在较为炎热的天气里空调以及水冷系统所消耗的电能是巨大的，这将直接影响到整个电力系统的峰值负荷，同时整个系统还有可能因为超负荷而断电。从太阳能科技的长远发展来看，太阳能制冷将是一个未被重视但又极具潜力的市场，并且它还有助于减少人们对化石燃料的过度依赖。另外，对于太阳能制冷而言，能量的需求量与供给量相当匹配：光照最强烈的时候，太阳能系统能提供最多的能量，而此时也是天气最热、人们对空调需求最强烈的时候（见图 3. 46）。

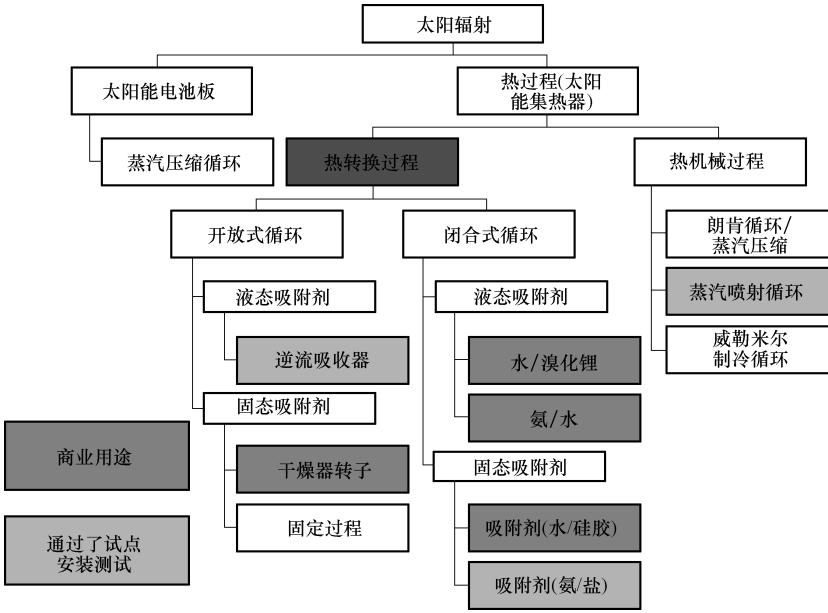


图 3. 46　太阳能制冷系统的分类（资料来源：© ISE）

奥古斯汀·穆切特再次成为太阳能制冷领域的先驱，他于1878 年利用其碟式太阳集热器和由埃德蒙·卡雷研制的间歇吸收式制冷机成功地将水冻结成冰。吸收式制冷技术与其他热驱动制冷技术（如吸附式制冷、固态或液态干燥剂制冷技术）一样沿用至今。这些技术的共同点就是完成制冷过程所需的外部能量均可由太阳能提供。吸收式制冷系统的工作过程如下：热量产生的浓度差驱动制冷剂（通常是水）从蒸发器蒸发出来并流到冷凝器中。处于蒸发器末端的制冷剂浓度最高，所以它极易吸收制冷剂蒸汽（当然制冷剂会被蒸汽所稀释）。制冷剂蒸汽在冷凝器中冷凝成为制冷剂水。随后将制冷剂水置于太阳光下使其受热并产生蒸汽，蒸汽扩散开来而制冷剂浓度再次上升。溴化锂是当前商业制冷设备中较为常用的吸收剂，而水则是较为常用的制冷剂。更小型的制冷设备还可以采用水作为制冷剂并采用氨作为制冷剂。吸收过程必须在极低压力条件下进行。

吸收式制冷机一般与该地区的区域供热以及余热发电相结合使用。太阳能制冷设备的功率一般在 10kW ~ 5MW 之间，并且能够提供冷水和冷气，实际上一般功率低于 100kW 的设备较为少见。这类系统的 COP（性能系数）一般在 0. 7 ~ 1. 1 之间。功率在 50 ~ 400kW 之间的吸收式制冷系统一般使用硅胶作为固态吸收剂。通常平板集热器和真空管集热器的性能系数一般在 0. 5 ~ 0. 7 之间并且最高温度为 60 ~ 90℃，这类系统的价格一般比吸收式制冷系统的价格高。

使用液态吸收剂的吸收式制冷机的功率一般在 15kW ~ 5MW 之间，而这类系统的输入温度为 80 ~ 110℃，相应的 COP 值为 0. 6 ~ 0. 8。吸收式制冷机每 1kW 制冷量通常需要 3 ~ 3. 5m^2 的集热器。干燥剂式制冷系统和蒸发式制冷系统的制冷能力一般在 20 ~ 350kW 之间，并且可通过模块化串联或并联增大制冷量。其工作温度只有 45 ~ 95℃，这意味着所需的热量可由简易的平板集热器提供，在某些情况下甚至可以由性能系数为 0. 5 ~ 1. 0 的空气集热器提供。对于开放式干燥剂制冷系统，大致的指导原则为平均作用每 1000m^3

空间每小时需要大约 8～10m² 的装机面积才能满足制冷需求，这些冷气既可用于制冷又可用于干燥，并且应用范围广泛（见表 3.3）。

表 3.3　太阳能制冷技术的应用以及所需条件（资料来源：ISE）

制冷技术相关应用	对于温度的要求	所需配套集热器
干燥系统	50～80℃	太阳能空气集热器、平板集热器
吸附作用	65～85℃	平板集热器、真空管集热器
单效吸收式制冷系统	70～100℃	平板集热器、真空管集热器、无太阳轨迹跟踪装置的集光器
双效吸收式制冷系统	130～160℃	高效真空管集热器、有太阳轨迹跟踪装置的集光器

当前使用的系统通常都带有旋转吸附转轮（也称为吸附转子），吸附转轮含有小型的气路并且具有较大的表面接触区域，表面带有吸湿材料（如硅胶）。一般在转子的前端部分就能完成对输入气体的干燥处理，之后气体在转子的第二部分被流过的废气加热升温，最终气体在热回收转子内通过常规蒸发与加湿过程进行降温。目前世界上有十多家吸附转子生产厂商，在未来的几年内，功率低于 20kW 的太阳能制冷装置肯定会推向市场，与太阳能供暖系统结合使用，可用于空气和水的加热和制冷。

到目前为止，全球只有大约 300 个太阳能制冷的案例，相关的技术仍在不断地发展与规范中。大多数情况下，太阳能制冷系统都较为昂贵，企业必须依靠相关补贴才能维持运行，但是这类系统未来在节省能源等方面极具潜力。

现在已有一些太阳能制冷系统的成功案例（见图 3.47 和图 3.48），例如，安装于土耳其达拉曼的太阳能制冷系统使用 180m² 的抛物槽式集热器阵列，其工作温度为 180℃，为一部二级吸收式制冷机提供能量，其性能系数为 1.2～1.5。该系统同时为一家旅馆提供冷气和一家洗衣店提供蒸汽。意大利的欧洲学院采用 480m² 的真空管集热器为一台功率为 300kW 的吸收式制冷机和一台功率为 630kW 的压缩机提供能量。这一系统自 2005 年开始投入使用，

整个系统中包含了一个 $10m^3$ 的储热装置和一个 $5m^3$ 的储冷装置。目前世界上最大规模的太阳能制冷系统位于希腊雅典北部的 Inofita Viotias，该系统带有 $2700m^2$ 的集热器，可为功率均为 350kW 的 2 台吸收式制冷机和 3 台压缩制冷机提供充足的能量，这些制冷机为一家化妆品厂的生产车间提供冷气。

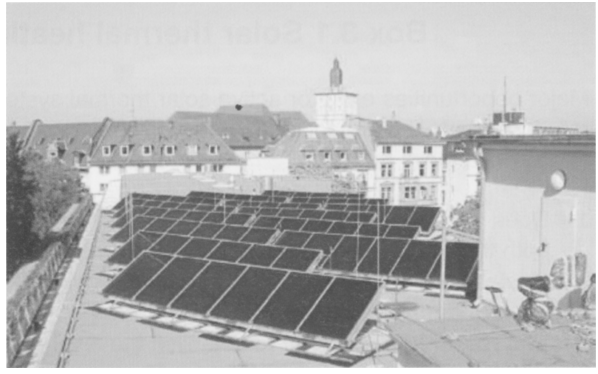


图 3.47　同时为加热系统和制冷系统提供热量的太阳能集热器（资料来源：摘自《Renewables made in Germany》，© 2008，Deutsche Energie-Agentur GmbH（dena）出版，德国能源局编写）

图 3.48　图为安装于法国于泽斯的一个太阳能制冷系统（资料来源：摘自《Renewables made in Germany》，© 2008，Deutsche Energie-Agentur GmbH（dena）出版，德国能源局编写）

一些系统利用储冷装置存储一定量的冷水以供太阳能无法为制冷机提供能源的时候使用。太阳能制冷系统通常都带有一个热力

泵，热力泵可使热量返回到地面或空气中，因此冬天时可以使热力泵反向运转而达到供暖的效果。

世界各地都常对饮用水进行制冷，许多办公室安装的小型桌面式电制冷冷水机是当代办公场所的一大特色。但是，现在已有一些厂商生产小型太阳能冷水机，并且开始进入写字楼这一巨大的市场。防止食物变质是太阳能制冷的根本目的，位于弗莱堡的夫琅禾费太阳能系统研究所（ISE）对突尼斯的酿酒厂和摩洛哥的牛奶厂的研究表明，太阳能制冷已可实现这一目标（见图 3.49）。作为 MEDISCO 计划的一部分（该计划旨在利用太阳能制冷技术对地中海的食品业以及农产品加工业提供帮助），旨在为酿酒和牛奶保鲜的太阳能制冷装置已经投入使用，该装置由欧盟委员会提供资金、由米兰理工大学具体实施。由此可见，太阳能制冷系统在市场取得一定的地位只不过是时间问题。

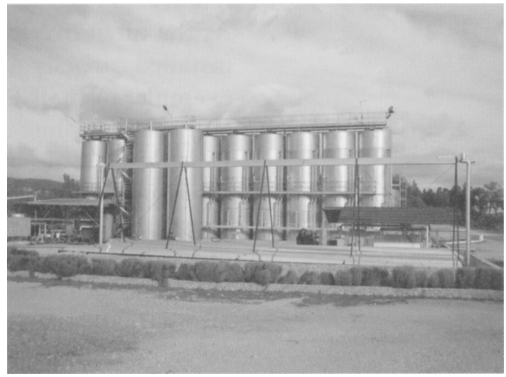


图 3.49　位于突尼斯的酿酒厂，该酿酒厂的冷藏室采用太阳能制冷系统。位于图片前方的太阳能集热器将热量提供给制冷机，而位于图片后方的发酵罐中的酒通过集冷器冷却（资料来源：ISE）

专栏 3.1　太阳能加热系统与制冷系统安装时需考虑的问题

主动式太阳能热系统安装在建筑物的最佳时机是在重新整修房屋的时候。项目负责人必须注意以下几点，其中一些注意事项同样适用于太阳能光伏发电的改进：

1）安装太阳能热系统，包括集热器和加热系统的时机是否与房屋整修计划一致？

2）选定太阳能加热/冷却系统规格前，是否对建筑物内的所有能源消耗进行过预估？

3）在系统安装之前是否对当地的日照情况进行调查？

4）系统规格是否满足要求？

5）屋顶是否能安装得下集热器或集热器能否嵌入安装在外墙上？

6）集热器是否能够大致朝向赤道方向？系统主要的工作时间段内集热器是否会被阴影遮住？

7）集热器能否处于最佳倾斜角位置？

8）建筑物是否能够承受太阳能系统的质量？

9）集热器输出的热量如何与加热或制冷系统结合使用？

10）是否有足够空间安装热水蓄水箱？安装过程的复杂程度如何？安装时是否需要更改建筑物的结构？

11）是否已经考虑到对建筑物结构和耗能设备（水龙头、供暖设备等）进行必要的更改？

12）是否需要对用户就新系统的使用进行培训？

3.15　未来展望

相比于太阳能电池，尽管装机容量更大，但太阳能热系统常被人们所忽视，随着技术的发展，它将在太阳能的利用中扮演越来越重要的角色。举个例子，在美国，住宅使用的热水系统、供暖系统

以及空调系统所消耗的能源占所有住宅能源消耗量的42%、总能源消耗的31%。美国住宅消耗能源所排放的CO_2占美国CO_2总排放量的38%、世界总排放量的8%。一个标准6m^2大小的太阳能热水系统全年能够产生的能量约等于一个功率为1kW的太阳能电池。可持续能源的开发者、监管机构、拥护者们渐渐意识到了这一点，并且开始重视对太阳能加热和制冷系统技术的开发与应用。太阳能热系统的应用在增加就业、节约能源以及减少CO_2的排放等方面具有非常大的潜力。

第4章 太阳能供暖系统

生活中有很多应用太阳能技术给建筑物供暖的例子，但目前还没有标准的系统或标准的方法，因为每一个案例都有其特殊性并需要相应的个性化解决方案。空间供暖系统可以划分为家用、小规模以及区域等应用规模，也可以分为水或液体加热系统和空气加热系统。这里将先讨论家用或小规模系统，再看看区域供暖系统的案例。

4.1 太阳能供暖的要求

无论住在哪里我们都需要采暖，尤其是在缺少阳光的冬天。另外，我们的生活终年都需要热水。因此，只提供生活热水、仅满足供暖需求或同时满足热水和供暖需求的系统在设计上有本质的区别。

从环境和成本的角度看，我们的目的不是得到一项价格实惠的技术而是尽可能减少能源消耗。因此，建筑物的设计应该遵循这个目标，并要优先考虑隔热和气密特性。优良的节能建筑需要具备优越的隔热特性、良好的气密特性，并且能够利用被动式太阳能进行通风，这样即使在隆冬季节，也仅仅需要最少的供暖量，甚至在一些情况下（被动式太阳能的建筑设计）仅靠居住者自身散发的热量以及房间内电器设备工作时散发的热量（如厨具、冰箱、计算机等）就足够满足供暖要求了。按照这种思路尽可能减小建筑物的能源消耗后，不足的热水供应和房屋供暖的需求就可以采用太阳能或其他可再生能源提供了。

4.2 小型或家用太阳能供暖系统

这种系统可分为采用热空气和水为导热介质的系统。

4.2.1 空气导热系统

最简单的系统是通过自然通风（烟囱效应），或者采用强制通风（使用风扇）直接将热空气导入室内，这种系统实际上仅适用于冬季时间较长，并且十分寒冷，但晴朗天气居多的气候条件。这些简单的系统只能解决一些特定的通风问题或季节性寒冷问题，如在商业或工业建筑中——仓库、存储室、飞机棚等，这些场所需要保持温度在0℃以上，并且其地板或围墙有足够的蓄热能力能够在夜晚保持住热量。由于建筑物的坐落地区不同，相应每个系统都是有其独特性的，如建筑朝向、当地的气候等。冬季太阳照射时间短，因此需要面积大的日光收集器。这种形式的太阳能供暖仅占全世界太阳能热量应用的0.8%（1.2GW）。集热器可以是带玻璃或不带玻璃的，上釉的也可以是不上釉的。日本和美国大多使用含有玻璃的系统，而瑞士和加拿大则大多使用不带玻璃的系统。

为使建筑物内的居住者获得最大的舒适感，太阳能暖气应该缓慢地、持续不断地从多个位置进入居住区，使居住者感觉不到空气的流动。最有效率的工作温度大约是32℃（90℉），因为这时人体感觉舒适，温度高于此值将导致更多的热损耗使效率下降。

1. 窗户箱式集热器

这个简单的系统含有一个位于朝阳方向的窗户下方的空气太阳能集热器。这个集热器是一个扁平的、内有多层的镶嵌板的箱子，它的四边中的三边密封并固定于室外。阳光透过玻璃照射在吸收热量的黑色金属板上（见图4.1）。这种装置能够加热附近的空气，加热过的空气上升，而冷空气则从底部被引进。暖空气从窗户的下方升入室内。集热器从前到后的结构分别为玻璃、一个上空气间层、一个黑色金属板、一个下空气间层、隔热层和底座。入风口和出风口是气密的，其风速可以由一个自动调温器控制。如果烟囱效

应不够强，不能从入风口吸入足够的空气进入集热器的底部，可以采用一个排气扇抽气。可由温度调节装置控制排气扇，排气扇还可由一个小的太阳能光伏模组供电。加热后的空气还可以通过管道系统送入室内更远的地方。

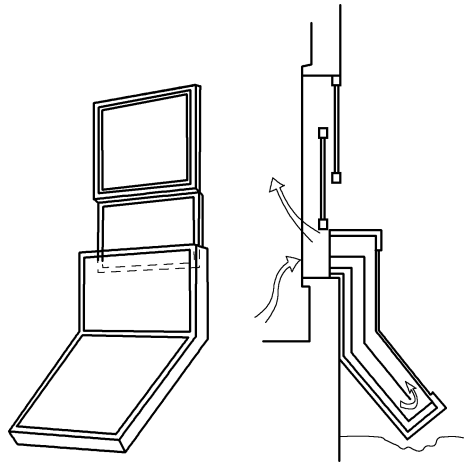


图 4.1　窗户箱式集热器
（资料来源：Kishore，2009）

2. 安装于屋顶或墙面的集热器

这个系统吸入室外的空气，对其加热并用风扇从管道送入室内（见图 4.2）。太阳能集热器可安装于屋顶或朝阳的墙上。这种供暖系统一般有两种结构设计，一种用数以千计的微小的毛细管材料吸收太阳热能。加热后的空气由导管向下输送到建筑物内，其排放口位于较低位置的地面附近。另一种设计是带玻璃的，并包含一个吸热板，用来加热它和玻璃之间的被吸引上来的空气，这种设计通常从室内地面处吸入空气，因其需要更少的加热，热空气从顶棚高处吹出。

屋顶集热器可以与机械通风系统连接以实现热回收。这个通风系统通过管道将空气送入建筑物顶部，并在排出废气之前使用热交换器进行换热。其热量被传导给由太阳能模组引入的新鲜空气。如

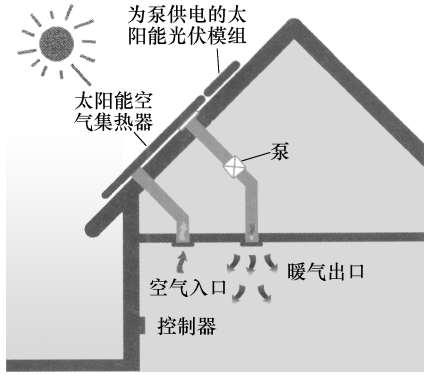


图4.2　安装于屋顶的太阳能空气供暖系统：屋顶上的集热器从室内吸入空气，加热后将其送回室内。理想情况下暖空气应从地面位置吹出，图中从天花板高度吹出是为了方便作图

果引入的空气比较温暖（在晴朗的日子），就不需要换热过程。但在夜晚和寒冷的日子，从太阳能模组引入的空气将接收回收的热量。这种类型的系统只适用于气密性相对较好的建筑物。因为空气的湿度在阳光照射时通常很低，这一系统也有利于室内除湿，置换内部潮湿的空气为温暖干燥的新鲜空气，它非常适用于潮湿的房间，如厨房和浴室。

3. 太阳能吸热壁（特隆布墙）

这一结构设计是由另外一位法国人发明的——菲力克斯·特隆布（Felix Trombe）。这种结构将建筑物的整个墙面变成了太阳能集热器，它由一个面向赤道的（北半球向南；南半球向北）、装有玻璃的、高热容的、暗色的墙构成（见图4.3）。这种结构的内墙一般位于临近大扇窗户位置，墙的顶部和底部是通往建筑物内部的通风孔。室内地面处的冷空气因气压差（烟囱效应）被吸入通风孔。这些空气在大扇窗户和墙之间的空间中上升，并在途中加热，然后从墙的顶部流回背后的室内（见图4.4）。建筑物室内进行合理的

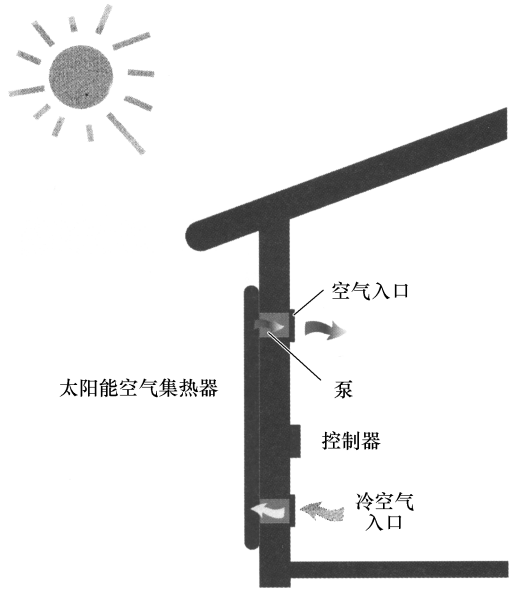


图 4.3　安装于墙面的太阳能空气供暖系统：冷空气从楼面地面处引入，加热后从更高处返送回室内

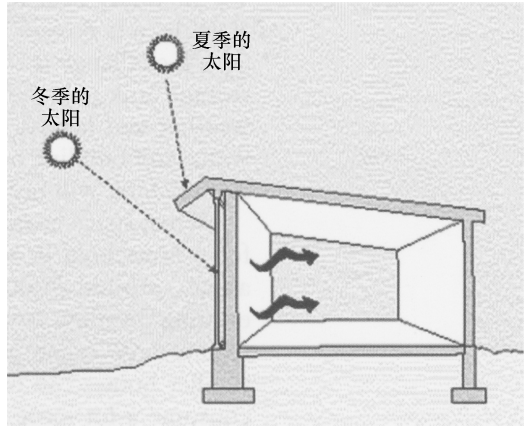
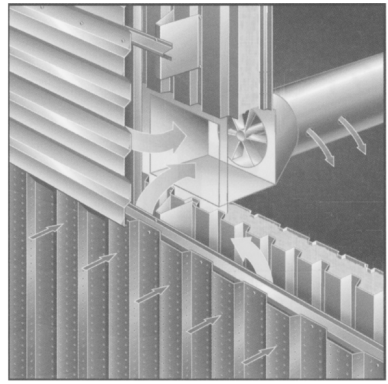


图 4.4　太阳能特隆布墙；整面墙变成一个太阳能集热器（资料来源：维基共享资源）

气流设计有助于把暖空气引到室内其他位置。此外，墙面也能够将吸收的热量传递到墙面的另一侧，并辐射到室内空间中。特隆布墙的缺点是改变了建筑物面向赤道的外墙的外观。

4. 太阳能墙

太阳能墙是特隆布墙的一个改进，它可能更适合于工业建筑，也被称为渗透型太阳能空气集热器（见图 4.5）。在面向赤道的墙



(a)

(b)

图 4.5　渗透型太阳能空气集热器或太阳能墙：
（a）剖面图和（b）工业上的应用（资料来源：Corus）

外包覆着铝或不锈钢并涂有吸收太阳能的涂料，这个金属层距离墙几英寸，并被打上数千个微小的孔洞。太阳对金属墙加热，位于墙壁顶部的风扇将暖空气排进空调通风系统，空调通风系统最好与其他换气装置一样也有内置的热回收系统，通风管道传输暖空气到建筑物内。这种结构很适合于新建或翻修的大型工业及商业建筑物，已有很多公司可提供成套的解决方案。

4.2.2　水导热系统

水导热太阳能供暖系统一般是混合或联合动力系统，太阳能用于预热水，这样就可以减小与之联用的其他加热系统的能量消耗，辅助加热系统可以使用电能、天然气或生物质能源。即便在瑞典或加拿大这种气候条件下，太阳能仍然可以作为供暖系统的主要加热能源（见图 4.6）。主要的设计挑战是选择恰当的设计尺寸，使得平板集热器面积和热水箱容积有效匹配，系统工作于最佳能效状态。这取决于当地气候条件和纬度、有效屋顶面积、热水的使用模式以及建筑用途。太阳能集热器面积越大，储热罐加热越快；如果过大，则所收集的热量将被浪费。

若同时需要空间供暖和生活热水，在寒冷气候条件下，一个家庭的能源需求可能高于仅需要生活热水时的 4 倍多——大约每年 20000kWh（精确的数额可由目前住宅的暖气费求出，如燃气费，它通常会以千瓦时为单位列出家庭使用了多少燃气）。隔热效果较好或面积更小的住宅的能源需求为 12000 ~ 15000kWh，而隔热效果不好的房子可能消耗得更多。因此，应尽可能提高住宅的热效率。更详细信息可参阅本丛书的另一本《可持续住宅翻修》（Sustainable Home Refurbishment）和本书介绍被动太阳能住宅能效的相关章节。

如果浸入式电加热器或燃气热水器与太阳能供暖系统结合使用，则可选用体积更小的储水箱。如果选用不常使用的烧木柴的锅炉作为辅助加热器，若空间允许，最好增加一个缓冲水箱用来存储太阳能加热过的水以节省木柴。从环保的角度看，使用生物质燃料

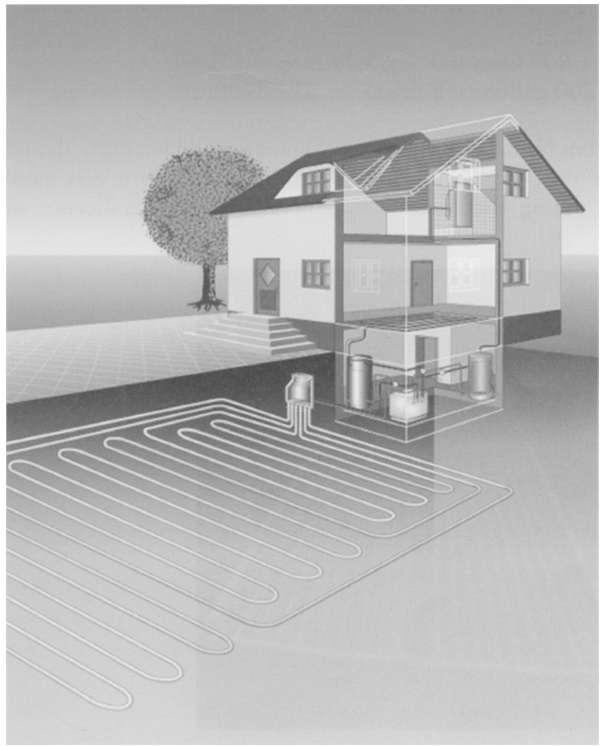


图4.6　带有地下室和基于水的太阳能供暖系统的新建住宅中，地源热泵的工作原理剖面图。这里使用了缓冲罐及地下供暖系统，太阳能集热器安装于房子面向赤道的墙上（资料来源：Bundesverband Wärmepumpe（BMP），德国）

的锅炉或火炉是更好的选择，因为它的碳排放量更低。除了冬季，太阳能热水器能够提供大部分的能源需求，而在冬季则只能提供一部分热量，此时不足的部分热量将由生物质燃料提供。

一台燃烧木柴的大功率（大于20kW）锅炉，在从生产热量到消耗掉热量的这段时间里，需要一个很大的储热罐来存储热量。同样地，储热罐的最佳容积取决于锅炉的热容量、居住者的热需求和

可用于安装二级储热罐的空间。大多数隔热性好的独栋住宅实际上不需要一台燃烧木柴的锅炉所能产生的所有热量。

一个太阳能空间供暖系统如果通过热辐射的形式来传递和释放热量将会更有效。辐射供暖使用一个大面积热发射表面，如地面或壁脚板，其最高温度仅为 35℃（95℉），而传统的壁挂散热器则约为 70℃（160℉）。这意味着热泵能够与太阳能相结合。而地热泵又比空气源热泵更好，因其效率更高，空气源热泵尤其在 0℃以下气温时有明显的效率降低现象。一个太阳能空间供暖系统将需要一个缓冲罐，其结构与大型烧木柴的锅炉所使用的热水罐类似。

这样一个系统需要多大面积的集热器呢？以奥地利为例（靠近欧洲南部），对于独栋住宅同时供应生活热水和空间采暖的混合太阳能系统的集热器面积是 12 ~ 20m^2（129 ~ 215ft^2）。对于一个隔热性好的住宅，这样的系统可提供总热需求量的 40%。当然，也有一些建筑有相当大面积的集热器和存储容量，这样的系统能够提供总热需求的 50% ~70%，甚至 100% 由太阳能供应。然而，比起那些只能部分满足供暖需求的较小系统，大集热器面积和大存储容量的系统效率更低，而且价格更昂贵（以每千瓦计算）。

有关与其他没有热水箱、即热即用、与其他加热源结合使用的太阳能水导热系统，可以参考室内热水供应的章节。此外，在美国、加拿大、德国和斯堪的纳维亚等国家安装了许多带有巨大热水箱的太阳能水导热系统，其大水箱可季节性地存储热量，详细信息参见本书的相关章节。

4.2.3　案例分析：约翰·凯尼文（John Canivan）系统

在纽约州长岛的一个家庭级别应用系统中，我们可以发现一些有价值的设计理念（见图 4.7）。在那里，约翰·凯尼文（John Canivan）建造了一个完全独立、面积为 8m^2、安装于屋顶的涓流式集热器。他监测并分析了冬季中期的相关数据后发现，在 1 月份，天气条件最好的天气里，最大日照强度介于 600 ~ 700 W/m^2 之间，对应的太阳能能量约为 586Wh/m^2（2000Btu/m^2/h）。

图 4.7　约翰·凯尼文（John Canivan）系统，安装于美国长岛（资料来源：约翰·凯尼文）

他由此计算出这个以 45°安装的集热器的，转换效率约为 50%，并且如预期的那样，阳光照射总量、集热器表面面积和可获得的热量值之间有直接的关联。他发现其水箱每天温度会下降 6 ℉（3℃），对应的 R 值仅为 $3m^2K/W$（U 值为 $0.33W/(m^2K)$，R 值和 U 值互为倒数关系）。因此，在冬季中期，他必须确保至少有足够的热量进入以抵消其容量为 200gal 的水箱的热量流失。对于 2009 年 1 月，可获得的太阳能为

$$15.5℃ \times 31\ 天 \times 909L \times 3.6kg/3.79L = 87kWh$$

$$(60\ ℉ \times 31\ 天 \times 200gal \times 8lb/gal = 297600Btu)$$

美国国家航空航天局（NASA）的数据（见图 4.8）显示长岛在 1 月和 12 月日照强度约为 2 ~ $3kW/m^2$。约翰发现实际上他所处的位置当年一年中的日照强度更有可能为 1kW，这也说明了安装位置的重要性——由于地貌形态的影响，约翰所处位置存在阴影和多云天气较多。尽管如此，他从一个被部分阴影遮蔽的太阳能集热器上记录的热量获取量仍可达 88kWh（300000Btu）。“在 1 月份，”

他的记录中提到，“这看起来似乎不够多，但（我推荐）用大 4 倍的集热器就可以在长岛的 1 月份轻易获取 586kWh（2000000Btu）的热量。”

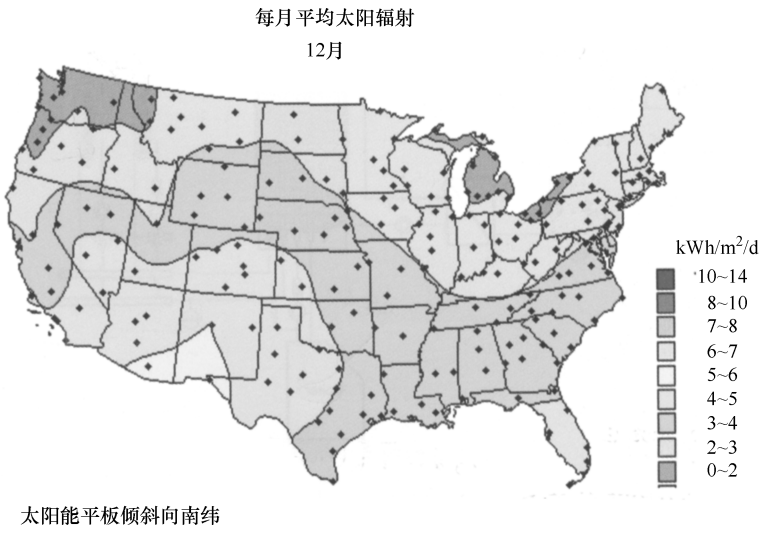


图 4.8　美国 12 月份日照图（资料来源：美国国家航空航天局

4.2.4　案例分析：美国威斯康星州的一个被动式与主动式太阳能房

Daycreek 是一栋位于明尼苏达州东南部的房子，为乔和艾伦·斯坦科维奇夫妇所拥有。它是一个梁柱式结构的两层楼房，房屋采用被动式和主动式太阳能供暖系统，一个柴火炉和电热锅炉作为辅助加热器，电力由当地电网和一个 4.2kW 的太阳能光伏发电系统供应。在冬季的晴朗天气，大部分的热量需求由被动式和主动式太阳能系统供应。被动式太阳能供热通过从朝南的窗户照射进入室内的阳光获得，在夏季，直射到这些窗户的太阳光则会被 1m（3ft）的飞檐挡住。

主动式太阳能供暖系统由 10 个 1.2m×3m（4ft×10ft）的太阳能集热器、2 套 75W 的西门子太阳能电池板供电的 2 台 24V/75W 的水泵和一个 364L（80gal）的生活热水箱组成。这套系统本来用于加热地板下面的经隔热处理的沙层，但因为热量穿过沙层进入室内地板需要大约 12h，沙层现已停止使用，根据专家建议，用一个更大的水箱来替代。当没有阳光照射时，房子是由一个 18kW（60000Btu/h）的烧木柴的皂石炉供暖。另外，还有一个 4.5kW（30000Btu/h）的电热锅炉作为备用供暖设施。

4.2.5 工业规模的太阳能供暖

2008 年的一项调查发现，工业用的太阳能热发电站只占全球太阳能热发电站总装机容量（118GW_{th}）非常少的部分（0.02%），并且这些太阳辐射热能只有一部分被用于空间供暖，其余的则用于产生工业过程热。工业建筑的热量需求量取决于建筑物的绝热水平、紧凑度或外形结构及其用途。室内储热能力、密闭性和通风损耗等都会影响热量的使用效率。大多数的工业建筑的墙壁和屋顶采用轻型金属结构，地面则为厚重的混凝土结构。更好的是，墙壁和屋顶在外层和内层薄金属板之间包含一层绝热层。太阳能建筑主要的设计目的是被动式供暖和制冷，热能模型用来决定额外供暖需求的程度。图 4.9 展示了一个典型的设计原理图。如果混凝土地面的热容足够，甚至可以减少一个蓄热罐，通过加热就能维持一个合理的、稳定的温度，全年日夜如此。最少厚度是 23cm（多于 9in）的绝热层应被安装在混凝土基底之下，使得热桥减到最小。

一个例子是在奥地利 Rutzemos 的 Neudorfer 的一个建于 2005 年的带有综合办公室的仓库（见图 4.10）。这栋附带办公室的建筑的设计是根据一个年度空间采暖消耗 18kWh/m^2 的被动太阳能房标准。太阳能集热器为安装在地板下的供暖系统供热，而表面集成太阳能板为室内提供电力。

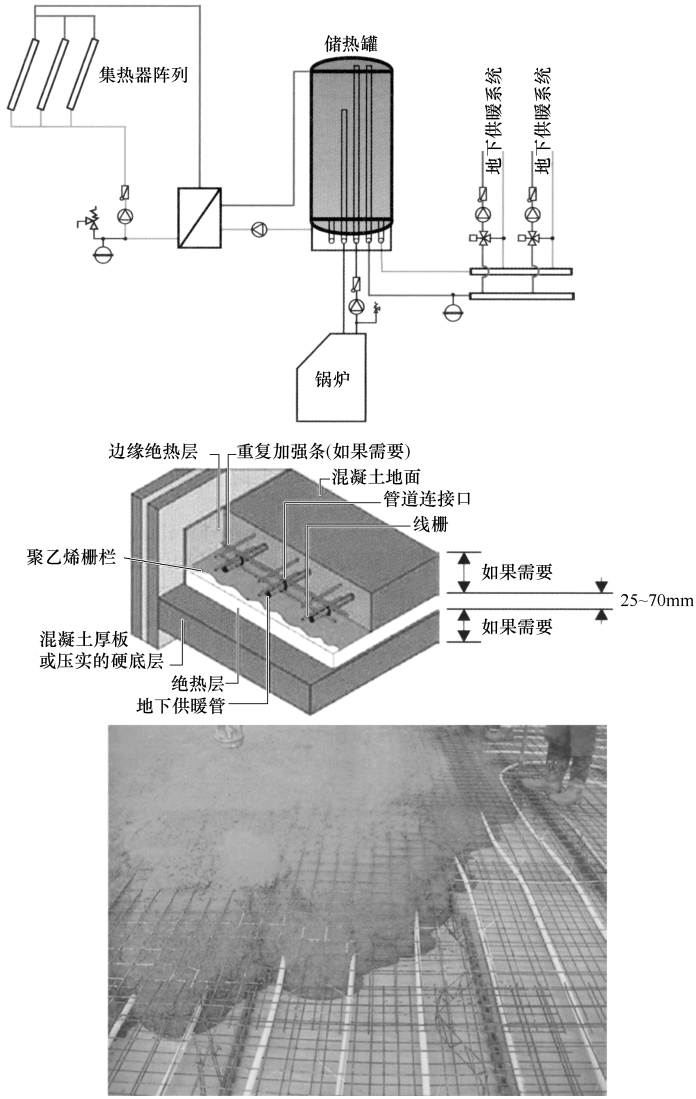


图 4.9　一个典型的用于飞机棚和工厂的工业规模的太阳能供暖系统的示意图。安装于屋顶的太阳能集热器阵列获得的热量储存在一个大小适中、带有辅助加热锅炉的储热罐中，储热罐中的热量再通过管道为地下供暖系统供热，管道纵向铺放在钢筋加强的混凝土地板下。图中的照片是一个飞机库（资料来源：© IEA-SHC）

图 4.10　位于奥地利 Rutzemos 的 Neudorfer 的一个被动式太阳能供暖标准办公大楼的空间供暖系统的太阳能集热器（资料来源：© IEA-SHC）

4.2.6　生产用热

这里值得一提的是在工业部门用于生产的太阳能热量。这些部门占经济合作与发展组织（OECD）国家的能源需求的 30%。其中，2/3 用于供暖，1/3 用于电力。对于供暖需求，差不多 3/4 是处于太阳能供暖技术能够满足的低温（高达 100℃（212℉））和中温（高达 400℃（752℉））范围。世界上已知的仅有约 100 个太阳热能发电站用于生产用热，其潜力是巨大的；它们大约提供世界总能源需求的 3%。会用到这样的热能的关键部门产品有：食品（包括饮品）、纺织品、运输设备、金属和塑料制品以及化学制品。除了空间供暖与制冷，它还可能被用来去污、干燥、脱水和蒸馏、加热杀菌、消毒等。世界上通过研究这种生产用热的来源而获益最多的地区是那些干旱炎热的地中海和热带地区。所有形式的集热器，

包括在第 3 章中提到的各种类型的抛物线形的碟或槽形的集热器都可以用在不同的应用中。这一方面最好的独立的资料来源是国际能源署（IEA），它把这一方面的研究结果作为先进太阳能供暖和制冷计划的一部分出版。

4.3　区域太阳能供暖

采用太阳能进行区域供暖始于 20 世纪 70 年代。虽然太阳能供暖不能完全提供一个地区全年所有供暖需求，但对其有重大的贡献并增进了供应的安全性。另一个益处是运营成本是固定的且可预测的，当然，也有助于减少温室气体排放。它们可以很好地与热电联产（CHP）系统结合使用。这一技术的领先国家包括瑞士、丹麦、德国和奥地利。拥有着 20 年运营经验的这类发电站开始转变，使太阳能区域供热系统顺利商业应用，并为公用事业公司、地方当局和房地产业提供服务。

太阳能区域供暖系统从大型集热场收集热量并存储在大型地下储热罐中。在某些案例中，使用的是天然的地下洞穴或水库，其他的则是专门开凿出来的特制的高度隔热的地下室（见图 4.11）。热量通过供暖网络分配给住宅和工业建筑。这种区域供暖设备通常有辅助的热源供应，辅助热源与太阳能供暖并联或串联工作。储热罐也可以是分散分布的，每一个寓所或商业单元各有其储热罐。在这种情况下，辅助热源采用每个单元一个锅炉的形式。南欧的大多数太阳能供热系统用来供应热水，北欧则是用于空间供暖。那些北欧的系统更经常地有中枢储热罐和辅助热源供应。技术解决方案能够有效地满足一个大范围内的需求。在集中系统中，为预防军团菌（Legionella），每天要确保容量较小的备用储热罐加热到 60℃（140℉）。

热量可以在个人公寓使用热交换单元通过集热器环道分配，或在中心通过循环管道分配。在冬季，集热器通过添加乙二醇来避免冻结，尽管排放回收系统在荷兰得到应用（见第 3 章）。操作控制和安全防护系统保护设备在夏季不至于过热。当用来供给热水时，

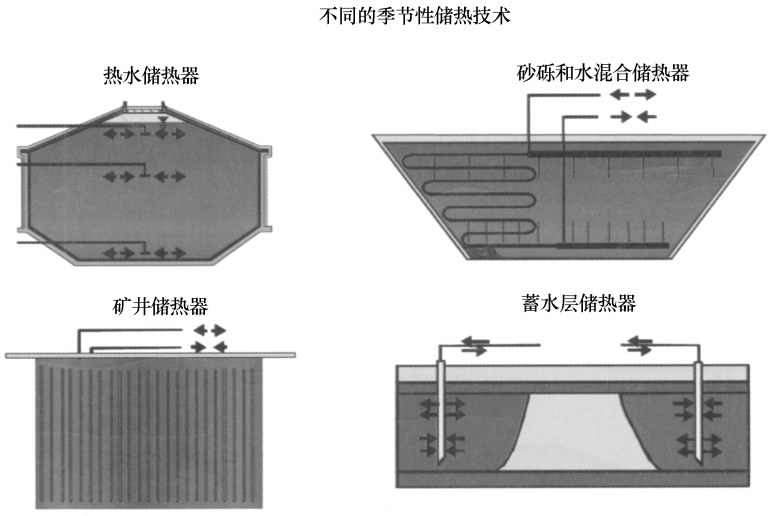


图 4.11　大规模供暖网络所使用的各种类型的跨季节性储热器（资料来源：SOLITES ）

这些系统通常满足了多达 60% 的热量需求。

要想成功设计供暖系统需要精确估算热水需求量。如果实际的消耗低于或超过预计，则系统是低效率的。太阳能供暖系统能够很容易地与现存的中心供暖和热水系统整合。在欧洲，目前一套系统的成本，包括管道工程、储存单元、控制系统和设计成本，是 600 ~ 1200 欧元每平方米集热面积。可变因素包括集热器类型、设计理念，以及建筑物的情况。当然，在一定程度上，这也取决于太阳能供应的热量占热量需求的百分比。一个粗略的建议，以中欧为例，要满足全年一半的热水供应量每个公寓需要的集热板面积为 1 ~ 1.5m^2，且每平方米集热板需要大约 50 ~ 60L（11 ~ 13gal）的太阳能储热罐。如果还需要补充热源，那么每个公寓需要的平板集热器面积约为 3 ~ 4m^2（32 ~ 43ft^2）。这样将有 15% ~ 20% 的热量来自太阳能系统。完整的太阳能区域供暖网络需要每个公寓 10 ~ 30m^2 的平板集热器才能产出一半的年度能量需求。这相当于有大约 1.5 ~ 2.5m^2（16 ~ 27ft^2）的集热面积和多达 5m^3 的储热容量每

1000kWh 的年度热量需求。可以整合平板集热器在建筑的一个表面或屋顶，以便可以节省一些资金。

热水储罐是高度绝热的容器。对于砂砾/水储热器，内部坑孔沿着专门的挡板排列并充满水/砂砾的混合物。热量通过水或盘绕的管道运输到储热器。这一系统比直接存储热水的容器热容要低，因此需要增加一半的体积。因为有钻孔或导管，太阳能热量通过钻孔转移到地下 20 ~ 100m（65 ~ 328ft）深处。由于土地热容能力更低，储热罐比热水单元要大 3 ~ 5 倍，但建造难度更低并能够按需要扩充。当与地下水没有直接联系时，它们运行得最好。对于蓄水层储热器，地下水被用来储备能量。它从钻孔中上升，被一个热交换器加热，再通过另一个钻孔返回蓄水层。热量通过水的倒转流动回收。单个热单元的成本是低的，但是这种应用需要特定的水文条件。

4.3.1　案例分析：菲德烈斯哈芬市（Friedrichshafen）的区域供暖系统

在德国的菲德烈斯哈芬市（Friedrichshafen）有一个自 1996 年起就开始运行的为 600 个家庭供暖的区域供暖系统（见图 4.12）。这个城市位于德国西南，其年均气温为 9.7℃（49.5℉），其度日指数（degree days figure，见第 10 章中的解释）在 17℃（65℉）时为 3717。这些房子建于 20 世纪 90 年代，其开始建设时就设计安装了一套供暖系统。一个总面积为 4300m^2 的太阳能集热器被安装于多层建筑的屋顶，夏季收集的太阳能热量存入一个温度为 40 ~ 90℃（104 ~ 194℉）的地下储热网络，热量通过另一个热交换器进入分配网络。各个房子的供暖和热水在独立的热量转移站中通过一个热交换器自行分离。该试验性项目的目标是提供几乎一半的空间供暖和生活热水需求，另一半则由燃气压缩锅炉提供。

部分集热器是倾斜地安装在屋顶上，而另一些则与屋顶一体安装。储热罐是圆柱形的，结构包括钢筋混凝土、20 ~ 30cm（8 ~

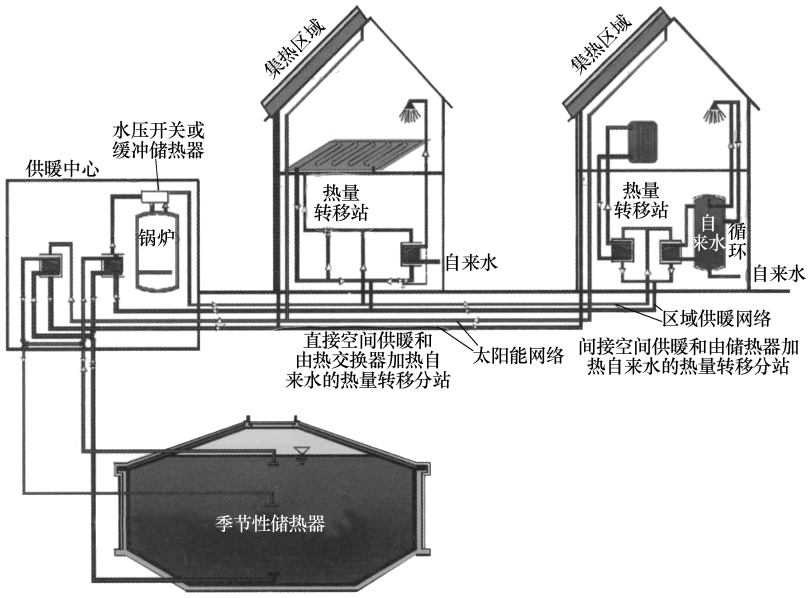
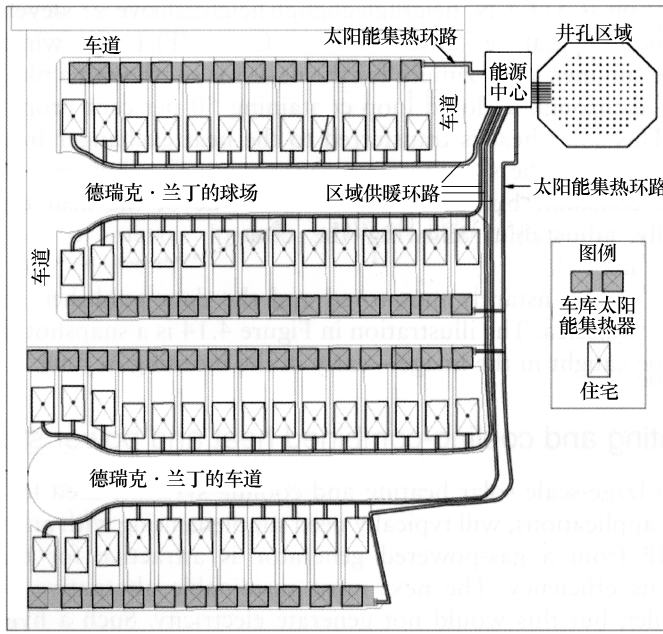


图 4.12　德国菲德烈斯哈芬市（Friedrichshafen）的区域供暖系统（资料来源：© IEA-SHC）

12in）的石棉隔热层，里层为不锈钢薄板以防止水蒸气扩散。该试点项目的运行效果不如预期，近期已经对该项目进行扩展和改进。

4.3.2　案例分析：德瑞克·兰丁太阳能社区

德瑞克·兰丁太阳能社区（The Drake Landing Solar Community，DLSC）是加拿大亚伯达省欧科托克斯镇的居民区，该区装备了一个中央太阳能供暖系统和采用了其他高能效技术，是该类系统在北美洲的首例（见图 4.13）。居民区 52 栋住宅，由 800 个安装在四排车库上的太阳能集热板供暖，每个车库有两排集热器。这些集热器在一个普通的夏日可生产 1.5MW 的热能，这些热能流入地下的跨季节性储热器中。系统还有两个大型的水平安放的绝热的热水箱，其直径为3.66m（12ft），长度为11m（36ft），热水箱内部的水温



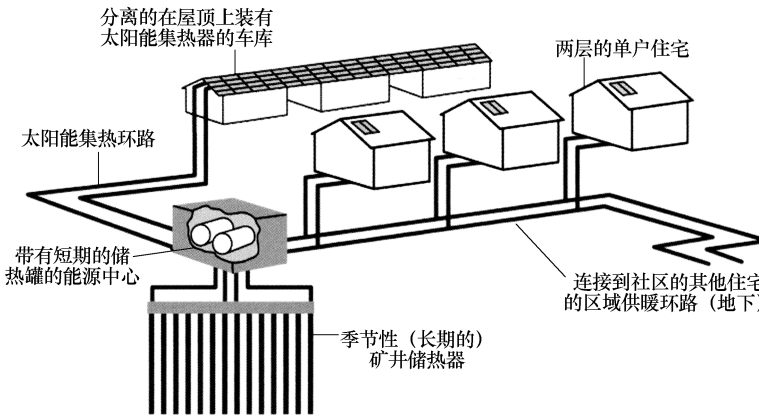


图 4.13　加拿大亚伯达省欧科托克斯镇的区域供暖系统的平面图和原理图（资料来源：德瑞克·兰丁太阳能社区）

分层分布以提高整体的效率。根据户外的温度，从热水箱通过塑料绝热水管分配到居民家中的热水温度介于 35～50℃（95～122℉）之间，热水的流量可根据热水的需求量进行调节。相对较低的水温可减少管道的热损耗、提高太阳能集热器的工作效率。为解决太阳能系统供暖不足的问题，每个住宅装备了一个特别设计的空气调节单元以保证有充足的热量供给，用户可通过恒温器把室温调节至感觉舒适的温度。预期该项目运行到第 5 年时可供应超过 90% 的热量需求。

在温暖的月份，热水通过一系列的管道从短期的储热罐输送给井孔储热（BTES）系统，井孔储热器位于地下 37m（121ft）处、直径为 35m，通过 144 个孔洞与管道连接。热水通过管道网络中时，热量被转移到周围的泥土中，泥土的温度在夏季末期将达到 80℃（176℉）。为了保持热量，井孔储热器填满沙子、高密度的 R-40 隔热材料、一层防水薄膜、黏土及其他园林材料。循环水通过钻孔系统的环路后返回短期储热罐以重新获得加热并重复相同的过程。

这一社区的位置是北纬 51.1°，西经 114°，海拔 1084m（3556ft）。其气温变化从冬季的 -33℃（-27℉）到夏季的 28℃（82℉）。集热器的方位是朝南且倾斜 45°，热量由含有 50% 的丙二醇防冻剂的闭合环路导热介质传递。太阳辐射的热量转移到热交换器，并且传导到短期储热罐的水中。通过集热器的水的流速是恒定的，但从热交换器流出的水的流速可根据控制系统预设的目标温升而自动调节。

这个系统被持续监测，其数据实时公布在 www. dlsc. ca 网站上。图 4. 14 是网站提供的数据的截图，数据采集时间为 6 月的一个清晨。

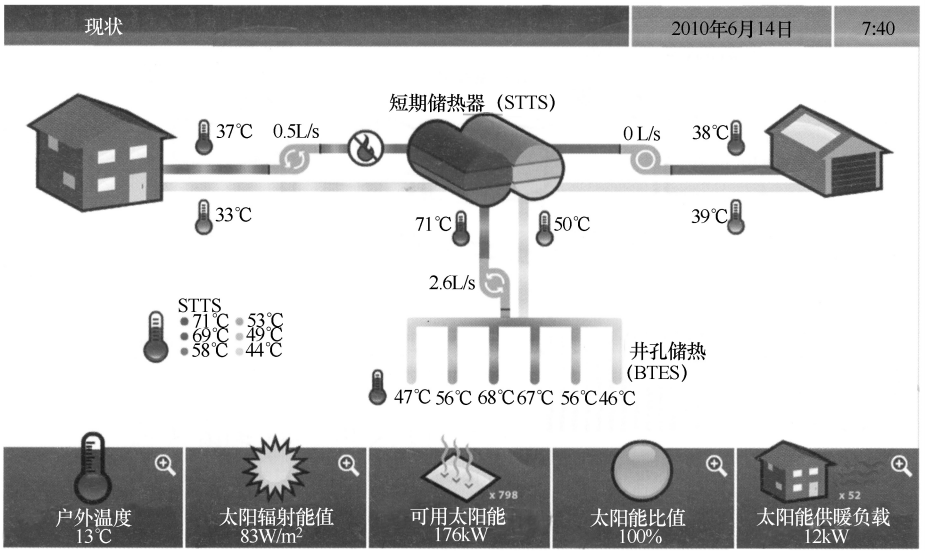


图 4.14　从德瑞克・兰丁太阳能社区的网站 www. dlsc. ca 上抓取的截屏，实时显示了它们的系统的运行数据（资料来源：德瑞克・兰丁太阳能社区）

4.3.3 太阳能热电联产供暖与制冷系统

用于区域应用或商业应用的中等规模到大规模的太阳能供暖与制冷系统，通常都需要使用另一种能源的辅助加热设备。基于燃气式发电机的 CHP（热电联产）是最好的选择，因为其效率较高。其次是燃烧生物质能源的锅炉，但它不能生产电力。混合系统使用吸收式冷却机实现制冷功能，并使用 CHP 系统回收热能，它不仅可满足夏季的制冷需求，还可减轻制冷需求导致的高峰电力负荷。另外，由于吸收式冷却机的存在，一整年的热量需求相对平衡，增加了系统的年运转时间，从而提高了整个系统的经济效益。这种设备的节能效率很高，尤其在需要制冷的季节，因为 CHP 单元中的热量能被用于热能驱动的冷却机而不是被浪费掉。

采用 CHP 的混合系统的主要挑战是两种能源之间的匹配，因为太阳能集热器和与之联用的发电站在运行时存在本质区别——太阳能组件的热能供应随天气变化而无规律变化，而 CHP 的运行则相对规律——其热回收的主要目的实际上就是冷却引擎。有关这方面的信息，设计工程师可参阅 IEA 发布的关于优化这两个组件最佳匹配设计的资源：Napolitano，A.，Franchini，G.，Nurzia，G. and Sparber，W.（2008）‘Coupling solar collectors and co-generation units in solar assisted heating and cooling systems’（“太阳能辅助供暖和制冷系统中的太阳能耦合集热器和热电联产单元”），Eurosun（欧洲太阳能能源会议），Italy（意大利）（其他更多的资源可从网页 www. iea-shc. org/publications/task. aspx? Task = 38 上找到，2011 年 2 月 6 日访问）。

第5章 太阳热能的拓展应用

太阳热能除了用于加热和冷却水和空间以外，还有很多应用。本章介绍利用免费的太阳能进行海水淡化、空气加湿、植物生长、物料烘干、消毒灭菌、巴氏法灭菌以及烹饪等。

5.1 海水淡化和污水净化

我们知道在亚热带和热带气候地区，可以利用太阳能对受污染的水进行净化，或者从海水分离出淡水。海水淡化和污水净化的方法有很多种。

太阳能蒸馏器

一个基本的太阳能蒸馏器可以通过水的蒸发和冷凝过程除去水里的杂质，这些经蒸馏过的水就可安全地作为饮用水，或者医疗用水，也可用于烹饪。全世界在用的这种小规模蒸馏器有成千上万台。

最简单的蒸馏器可以用玻璃或透明塑料以一定的角度覆盖在装水的水盘上而制成（见图 5.1）。当然，使用玻璃比塑料更好，塑料在紫外线的照射下容易变质老化，而且水在其上面不容易冷凝。水盘表面要涂黑以利于吸收尽可能多的太阳能。当太阳光加热水盘里的水，水吸热蒸发为水蒸气，水蒸气上升并与玻璃或塑胶盖板接触后凝结成水滴，水滴沿着倾斜盖板流到集水容器里，盖板的最佳倾斜角度为 10°～20°。

水槽里水的初始温度越高、冷凝盖板的温度越低，则蒸馏器的工作效率就越高。下面的一些措施有利于提高蒸馏器的效率：

1）涂有低辐射膜的玻璃。

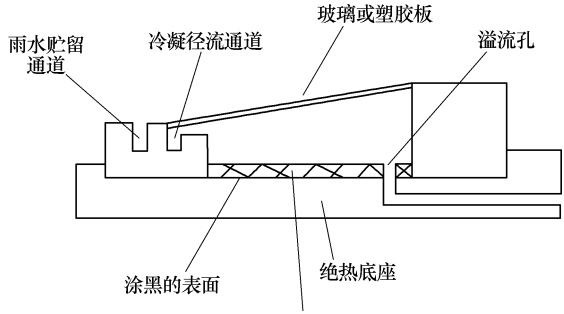


图 5.1　太阳能蒸馏器基本结构示意图（资料来源：Otto Ruskulis for Practical Action）

2）水槽除了面向太阳的一面外，其他各面都绝热。

3）涂黑的表面。

4）水深不超过 20mm（0.79″），加热更快。

5）收集太阳热的盖板倾斜角度大于 15°，最理想的情况是垂直于正午的太阳，在北半球时面向南，而在南半球时面向北。

6）收集器应远离建筑或树木的阴影。

太阳能蒸馏器的效率一般介于 25% ~50%。傍晚时分效率最高，此时水槽里的水还很热，而空气的温度正在下降。在较低温度下，冷风也有助于水滴的冷凝。太阳能蒸馏器如果维护不好也会出现问题，如组件之间的缝隙会导致冷风吹进来。裂缝、灰尘、海藻生长，或者玻璃或塑胶盖板上的划痕都会降低太阳透射率。水槽里的残渣也必须定期清洗，而且在工作期间不能出现干涸。太阳能蒸馏器也可以通过增加一个外部排水槽来收集雨水。

我们可作如下估算：对于一个日均太阳能辐射量等于全球平均值即 5kWh/m^2 的地区，假设太阳能蒸馏器的工作效率是 30%，每天每平方米的蒸馏器大约可以生产 2.3L 的饮用水，平均一年可以生产 1m^3 的水。人类每天大概需要 5L（1gal）的饮用水，因此，每个人至少需要 2m^2（22ft^2）的蒸馏器。如果在有限的空间面积的

条件下需要更多的饮用水，这时更适合利用太阳能光伏电池方法生产饮用水，它利用太阳能光伏供电的反渗透制水方法，有关这个方面更多的信息详见本书第 7 章。必须注意的是，利用光伏电源生产饮用水时，用于蒸馏水的那部分能耗大于抽水泵抽水的能耗。因此，如果附近有新鲜的水源适合用抽水泵抽水获得，利用光伏方法是个成本效率较高的解决方案。

蒸馏法只适合于把溶解的盐分离出来，若要净化只含有悬浮颗粒的污水，则砂滤器可能是更好的选择。

5.2　水冷温室

在热带干旱的沿海地区，可以把蒸发冷却（参考第 2 章）和海水淡化两种技术结合起来，为农作物的生长创建一个最佳的环境和提供干净的灌溉用水。

水冷温室一般建造在水域如海水边上。水被引到铺在温室一边地板上的纸板上，纸板上的水蒸发，潮湿空气被吸入温室，起到冷却效果，降低了温室里的温度。在温室的另一边，利用冷凝器把空气中干净的水蒸气冷凝，最后液化出淡水。冷凝器用冷水作为冷却液。温室的支撑物是轻型钢结构，顶部以聚乙烯或玻璃为盖板，聚乙烯薄膜可以反射紫外线，吸收红外线。由于水中碳酸钙的结晶，纸板做的蒸发器的强度得以增强（见图 5. 2）。

水冷温室的想法已经被利用到更大规模的项目上——撒哈拉森林计划。该项目旨在开发一个完整的、大规模的、综合性的系统来生产淡水、能源和农作物，目前撒哈拉森林示范中心正在建设之中。另外，在南澳大利亚州，世界上第一个商业化的海水温室已经在经营了（见图 5. 3）。

温室里凉爽潮湿的环境使得农作物生长时仅需要极少的水分，并且由于农作物不会受到过度蒸腾耗水的影响，其产量更高、品质更好。水冷温室模仿了自然界的水循环：海水被太阳加热而蒸发，冷却形成云，然后以雨、雾或露水的形式返回到地球。

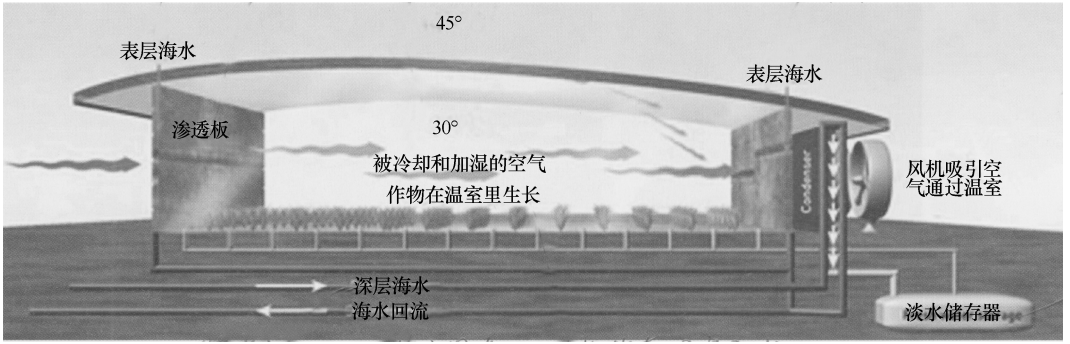


图5.2　海水温室的原理是海水经太阳加热在温室的前端蒸发，从而创造了温室里凉爽潮湿的环境。其中一部分被蒸发的海水冷凝成淡水，可以用来灌溉农作物。进入温室的热空气首先被第一个蒸发器上流淌下来的海水冷却和加湿，这给温室内的农作物提供了很好的生长条件。随着空气离开种植区，经过流淌着海水的第二个蒸发器，这些海水是从温室顶部被太阳加热的网状管道中流下来的，从而使空气温度升高，湿度更大。这些热空气穿过一系列由冷却海水流经的垂直管道。当湿热空气遇到冷却的管道表面时，水蒸气将凝结成淡水水滴，流到底座被收集起来（资料来源：© Seawater Greenhouse Ltd）

图 5.3　位于南澳大利亚州珀特奥古斯塔港的海水温室于 2010 年秋天设备安装完成后就开始生产淡水、蔬菜和海盐（资料来源：© Seawater Greenhouse Ltd）

热泵制冷

在一些由于气候原因，导致夏天和冬天季节性温差较大或白天和黑夜温差较大的地区，利用热泵制冷是一个较为可行的方法。热泵制冷的原理与冰箱制冷的原理类似，但过程刚好相反。也就是说，冰箱把热量从里面泵出到外面，而热泵则是把热量从外面泵入到里面。热泵是把体积较大的低温空气压缩使其温度上升，这些压缩后的热空气不是被泵入冰箱里，而是一栋建筑或一个房间里，这样就可以把外面的热量不停地泵入到室内，这种原理同样适用于更大的空间范围。热泵可以从自然界的空气、土壤或水域中获取热量，也可以把热量传递给上述物质。

热泵由电力驱动，其性能取决于热泵的 COP[㊀]（性能系数）。性能系数是指热泵所产生的热量或制冷量与热泵所消耗的电功率的比值。因此，若一台热泵的性能系数是 3（或者 3∶1），意味着它产生的热能是其消耗掉的电能的 3 倍。性能系数越高，热泵的性能越好。

很多热泵是可逆的，可用于制冷。其阀门可以改变制冷剂的流动方向从而达到对建筑物制冷的效果。即使对于仅具有加热功能的水对水热泵，夏季时也可以通过直接使用土壤盘管回路得到少量的“被动式”制冷，例如，夏季时旁路热泵使水在埋于地下的管道和风扇对流散热器之间循环。如果是利用可再生的能源，如太阳能光伏电池供电，则热泵的节能效果最佳。

5.3 太阳能干燥器

在世界各地，干燥法都是最常用的食物保鲜方法。最简单的干燥方法就是把产品（无论番茄、香料、草药、坚果、胡椒、大豆还是鱼）放在太阳能照射到的垫子、屋顶或地板上暴晒。当然，这样做的好处就是不用任何费用，而且可以在家附近完成。但是如果想要确保食物免受灰尘和细菌的污染，那么太阳能干燥器是一个

㊀ COP：coefficient of performance. ——译者注

简单的解决方案，但费用会稍微高一点。

太阳能干燥器还有其他的优点：由于可以达到较高的温度，所以干燥时间可以缩短且更多的水分被蒸发掉。在相同的空间里可以放更多的食物，且可以确保食物远离污染和不被雨淋到。太阳能干燥器即使在没有阳光照射的时候也可以照常工作。规模化地使用太阳能代替使用柴火或电力的干燥器可以节省大量能源。

5.3.1　基本结构

太阳能干燥器的基本结构为一个隔热的带有塑胶或透明玻璃盖板的隔间或盒子。热空气从底部流入，在上升过程中吸收干燥器中物品的水分并从顶部出风口排出。干燥器的大小和形状取决于所干燥的物料以及干燥系统大小，对于大的干燥系统，甚至可以利用谷仓作为干燥室，而对于小的干燥系统，可能是用一个小木盒做成的干燥室，里面只能层叠堆放几盘需干燥的物料。

干燥室的内壁和太阳能蒸馏器一样，涂成黑色以利于吸收更多的太阳热能，用玻璃盖板比用塑胶盖板能更好地吸收太阳热能。将集热器面向太阳并与地面成大于 15°的夹角以利于雨水流下。此外，它最好能垂直于正午的太阳放置，在北半球正面朝向南方，而在南半球则正面朝向北方，而且要避开建筑物和树木的阴影。

5.3.2　帐篷式太阳能干燥器

帐篷式太阳能干燥器是太阳能干燥器的另一种基本形式。它的基本结构是在一个脊梁上覆盖一个塑料盖板并使其成褶皱状垂下固定在杆的底座上，黑色塑料盖板应用在面向太阳的墙面上，需干燥的食物放置于地面上的架子上，帐篷的尾端被封堵以免灰尘进入并可以保持里面的热量。这种太阳能干燥器容易受大风天气的影响。

5.3.3 支架式太阳能干燥器

支架式太阳能干燥器是带有合页透明盖子的一个木制的盒子（见图5.4），盒子内壁被涂成黑色或贴上黑色塑料，而且底部是隔热的。需干燥的食物被放置在网状托盘上或支架上，空气通过前部的通气孔进入，然后经顶部和后部的通风孔流出。

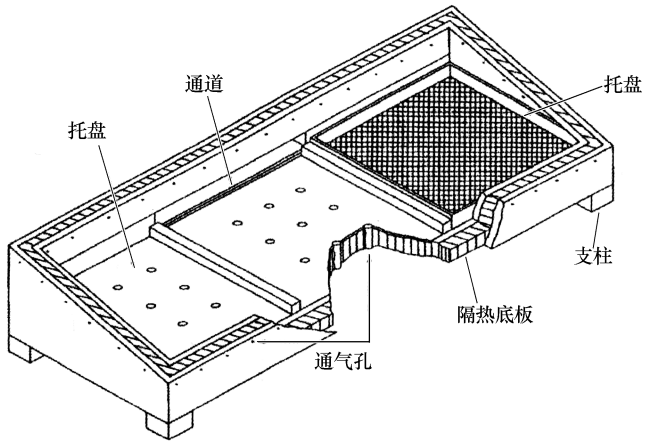


图5.4 支架式太阳能干燥器的原理示意图（资料来源：Practical Action，Schumacher Centre for Technology and Development）

5.3.4 间接式太阳能干燥器

更复杂的一种太阳能干燥器是把放置于地面上的太阳能集热器的热空气导入到一个垂直橱柜中，在橱柜里放置网状货架或置物架，而需干燥的物料就放在这些置物架上。空气经过物料后由顶部的烟囱或烟道排出。这种太阳能干燥器的好处是需干燥的物料不用直接暴露在太阳底下。热空气经过物料后上升，在烟囱顶部聚集，形成烟囱效应（见图5.5），这就是所谓的间接式太阳能干燥器。

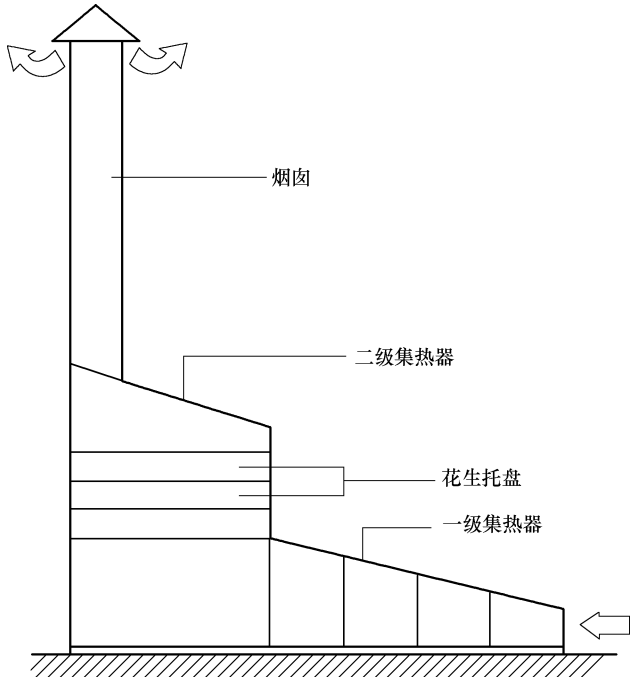


图 5.5　间接式太阳能干燥器的原理示意图（资料来源：Practical Action，Schumacher Centre for Technology and Development）

5.3.5　太阳能干燥炉

太阳能干燥炉已用于风干木材，它类似于一个温室（但太阳能干燥炉只有面向太阳的一侧需要用透明的玻璃），但是热空气是由底部引入，然后从顶部开口排出，开口处需做防水处理以防止雨水渗入。需干燥的木料就堆放在里面，热空气就可以在木料间流通而从顶部排出，这种太阳能干燥炉可以显著加快木材干燥过程。

5.4　太阳能巴氏灭菌器

类似的系统还可用于太阳能巴氏灭菌。每年有数百万人由于饮

用受污染的水而生病。巴氏灭菌法是通过在大约 6min 内把水加热到 65℃（149℉）以除去病原体而达到净化水的效果。它不需要把水加热到沸腾，就可杀死水中或牛奶中所有会在人体中引起疾病的细菌、病毒和寄生物以及霍乱、A 型和 B 型肝炎病毒。牛奶的巴氏灭菌一般是在 71℃（160℉）时加热 15s。

水或牛奶可以通过太阳能灶进行巴氏灭菌。这一领域的先驱者是鲍勃·梅特卡夫（Bob Metcalf）博士和他的学生戴维·乔凯蒂（David Ciochetti）。早在 20 世纪 80 年代初期，他们就发现当黑色广口瓶里受污染的水在箱式太阳能灶里被加热到 60℃（140℉）时，水中的球菌和轮状病毒——两种容易引起儿童严重腹泻的病菌就会被灭活。1984 年，他们得出结论，当受污染的水加热到 65℃（149℉）时，所有的病原微生物都会被灭活。

由于在全世界范围内，很多人还难以得到温度计，所以就需要一个简单的设备来指示水的温度是否已达到巴氏灭菌的温度点。1992 年，戴尔·安德烈亚塔（美国加利福尼亚大学的一个机械工程研究者）对弗雷德·巴雷特博士于 1988 年设计的原有模型进行改进，研制出了水巴氏灭菌指示器（WAPI）（见图 5.6）。水巴氏灭菌指示器是一个装有大豆蜡的干净的塑料管，大豆蜡大约在 70℃（158℉）下就会熔化。WAPI 塑料管的顶部装有固体状的大豆蜡，把 WAPI 放置在被太阳能加热的黑色水容器的底部，如果塑料管顶部的蜡熔化后掉到塑料管的底部，就说明水的温度已经达到巴氏灭菌的条件。WAPI 塑料管配有不锈钢垫圈以确保塑料管能固定在容器的底部，因为容器底部在太阳能对水加热的过程中始终是整个容器中温度最低的位置。一个自动恒温器可用于控制流过巴氏灭菌器的水的流速（见图 5.7 和图 5.8）。

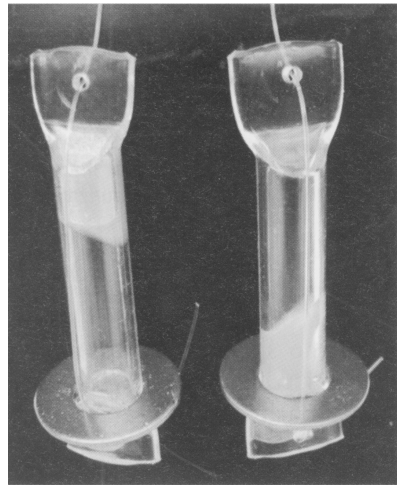


图 5.6　在太阳能炊具国际会议上展出的水巴氏灭菌指示器（WAPI）的固态蜡状态（左）和液态蜡状态（右）

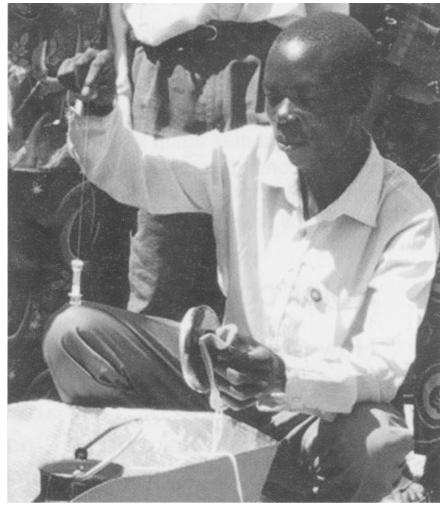


图 5.7　在坦桑尼亚，博尼费斯·卢汉德演示了利用 CooKit 太阳能灶（一种品牌的太阳能炊具）和水巴氏灭菌指示器（WAPI）进行太阳能水巴氏灭菌

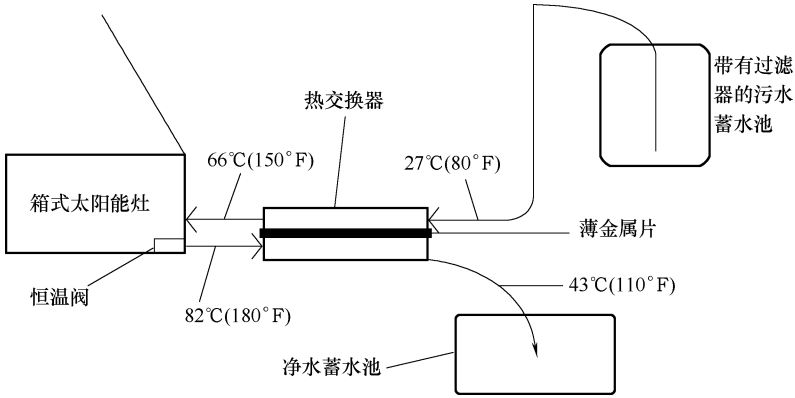


图 5.8　太阳能水巴氏灭菌指示器的原理示意图。污水通过薄金属板流入箱式太阳能灶，在经过金属板的途中，它吸收了已经由太阳能灶加热过的纯净水的热量。恒温阀只有当水的温度达到所设定的温度点才会打开让水流出。纯净水在到达净水蓄水池前再次经过热交换器，把部分热量传递给要流入太阳能灶的污水，从而达到冷却的效果。由于顶部的水温通常比底部的水温高 2 ~ 5℃（36 ~ 41℉），所以把 WAPI 置于较低的位置有助于进一步确保水温达到巴氏灭菌的条件

5.5　太阳能灶

用太阳能煮的饭尝起来该会是什么样的呢？本书不讨论烹饪的方法，但是利用太阳能灶进行烹饪确实有很多方法可选择，如煮、炸、烤、烘焙等。他们可以像标准的炉灶一样用于炒或油炸食物，甚至可用于烤面包——更不用说烧水冲泡咖啡和茶。

太阳能灶最早是由美国天体物理学家查理斯·格里利·艾博特于 1915 年发明的，在乔治·埃勒里·黑尔的威尔逊山天文台工作时，他和妻子莉莲就是用太阳能灶烤食物给当地员工吃。艾博特是利用太阳能的先驱者，他还制造了很多测量太阳辐射能的设备。

5.5.1　设计和原理

使用太阳能灶设备，一天所需的菜很有可能都可以通过一个碟子来煮熟，因为它通常是用一个抛物面的反射镜（通常称为“碟子”）来煮食物。反射镜正对太阳时，照射在镜面上的所有光和热量都会被反射到一个“焦点”上。如果把一个黑色的蒸煮容器如炖锅或者平底煎锅放在焦点处，它将吸收能量从而加热食物。

还有其他设计形式的太阳能灶，如箱式和槽式太阳能灶。所有的太阳能灶都含有明亮的反光片或反光面。较小型的太阳能灶可以折叠以便于携带，更简单的太阳能灶可用纸板和银箔构建，甚至碟式卫星电视接收器也可以改造成太阳能灶，更复杂的样式由阳极氧化铝膜组成，其支架易于收合。

不管设计形式如何变化，但是太阳能灶的工作原理都是一样的：把太阳热能聚焦到锅上。因此，太阳能灶必须直接指向太阳，而且在烹饪的时候，通常需要通过手动频繁地移动位置，以便跟随太阳在天空中位置的变化，因为只有直射太阳光才是最适合的。在给定的日照强度下，集热器的面积越大、焦点越小，焦点处的温度就越高。焦点处的温度很快就可以使锅里的食物达到沸点并持续炖煮，烹饪的温度还可以根据需要进行调节，调节方法是故意使集热器不正对太阳光。只要白天太阳直射的温度可以到 24℃（75℉）的地方，都可以使用太阳能灶。

处理锅灶时务必小心，因为它处于太阳光线汇聚的焦点处，温度极高（见图 5.9）。

5.5.2　太阳能灶的应用

太阳能灶可作为烧烤的优先选择（不管郊游露营时还是在家里），因为可以节省用于制造木炭的树木。在世界主要靠烧火烹饪的部分地区，太阳能灶是很有用的。例如，在非洲、印度等地方，米饭、豆类食品或者炖鸡等通常都是用炉火烹煮几个小时，实际上这样做是很不明智的，因为煮太久会破坏营养成分。世界各地很多

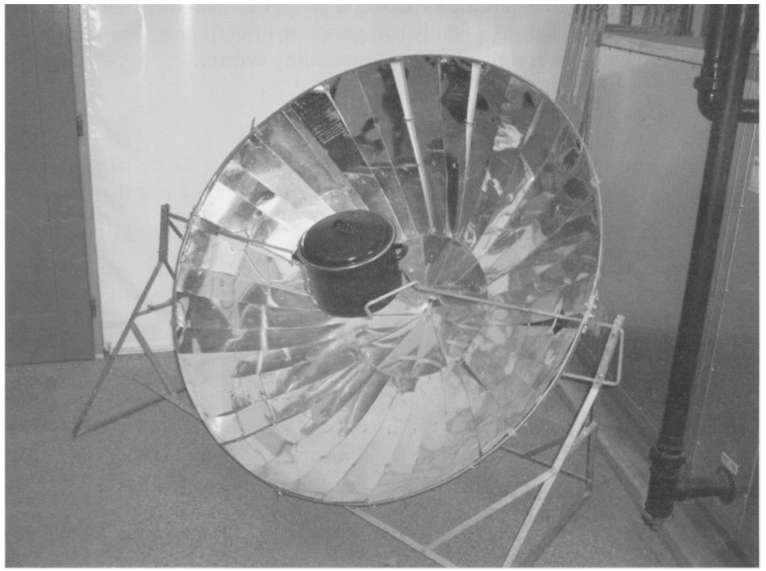


图5.9　抛物面碟式太阳能灶，锅具位于焦点处（资料来源：Creative Commons）

森林被砍伐都是迫于对生火煮食的需要，很多人的时间都是花在寻找木材上。同时由于生火而每天吸入的烟尘对人体存在相当大的健康风险。因此，太阳能灶不仅可以减少柴火的需求，而且有益健康，节省时间——或者说省钱，当木材燃料需要购买的时候就可以说是省钱——并且可以减少空气污染（见图5.10）。

太阳能灶的缺点是只有有太阳光的时候才能用，而且烹饪的速度较传统的方法慢（至少需要2倍的时间），因此使用者必须改变烹饪习惯以适应这种变化。由于这些原因，使得太阳能灶无法完全替代传统的烹饪方法。

在某个地区引入太阳能灶项目通常需要进行适当的培训。学员要学会改变食谱、烹饪方法、烹饪时间，以便利用这种新的设备烹饪当地传统菜肴，同时他们还要学会如何清洁太阳能灶以确保其表面洁净。例如，在多米尼加共和国，一个太阳能灶项目要求一个家庭在购买或获得太阳能灶之前，必须先学会怎么使用它并在社区中

图 5.10　来自印度马德雅普拉德邦 Sendipuri 村的妇女们正在 Barli 研究所接受培训如何使用抛物面碟式太阳能灶。这个太阳能灶是由 Terra 基金会发起的一个项目捐赠的

心试煮几次饭菜。

5.5.3　热箱

太阳能灶可以连同“热箱”或“干燥箱”一起使用（见图 5.11）。热箱仅是一个隔热的箱子，把已经沸腾的锅放在里面，它

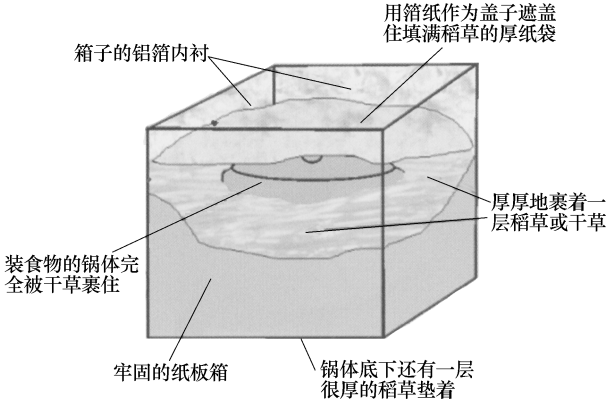


图 5.11　热箱烹饪的工作原理的剖面图

就可以保温足够长时间以炖熟锅里的饭菜。热箱可以在市场上买到，也可以自制，如用用过的聚苯乙烯包装袋、纸张、毛织品，或干草等使其紧密地裹住锅体。热箱甚至可以用硬纸板制作而成，内表面加上铝箔内衬有助于收回反射热量，使其不易往外传导。如果所煮的食物要等到晚上才吃，热箱可以对其保温到傍晚。

5.5.4 制造商

市场上可以买到各种各样的太阳能灶。如一款在喜马拉雅山脉上使用的太阳能灶叫做 SolSource，其质量轻，可折叠的抛物面集热器由几个三角形的牦牛毛帆布面板沿着弯曲的竹架拉伸而成，集热器表面为镀铝聚酯薄膜（Mylar ®）。

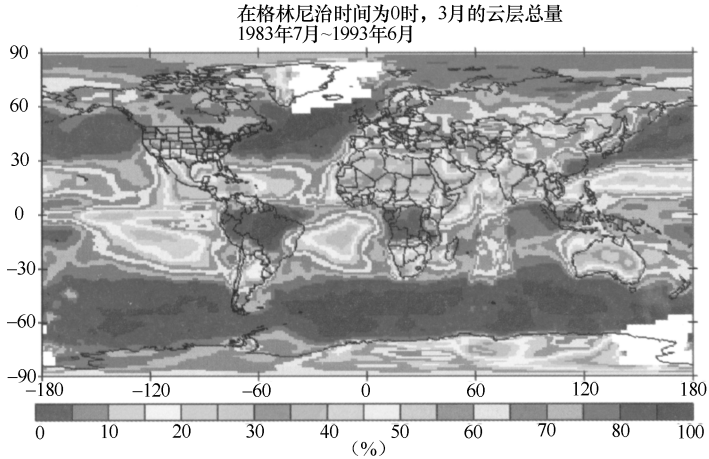


图 5.12　美国国家航空航天局（NASA）有一个交互数据库，你可以在上面免费查询世界各地区各个月份平均云层的多少。更多信息可以参考本书第 10 章（资料来源：NASA）

在印度，太阳能灶是由一个叫做“非常规能源促进者和研究者（PRINCE）”的研究小组研制出来的。它是由安装在弯曲金属棒上的一系列阳极电镀铝条制作而成的“方形”集热器，方形外

框尺寸为 1.2m × 1.2m（3.9ft × 3.9ft），集热器把太阳光反射到锅具上。它的部件在 Aadhunik 全球能源网站上有零售。

CooKit 是另一种形式的太阳能灶。它是由纸板和铝箔做成的，一个耐热的袋子（或类似的透明罩）裹住锅体，袋子的作用相当于允许太阳光照射在锅上而禁止热量散发出去的小型温室（见图 5.13）。其质量大约有 500g，折叠起来与一本大的书差不多，方便携带。这是由太阳能炊具国际组织发明的一款太阳能灶，它是在法国科学家罗杰·伯纳德的设计基础上发展而来的。只要几个小时的日照，CooKit 就可以在常温下完成供 5 ~ 6 人食用的饭菜，而且做出来的食物营养保留很好，不会烧焦或过于干燥。对于人数较多的大家庭需要两台或更多的这种太阳能灶。它可以从市场上购买到而且价格不高，或者根据 http：//solarcooking. wikia. com/wiki/CooKit 网站的指导进行自制（见图 5.14）。

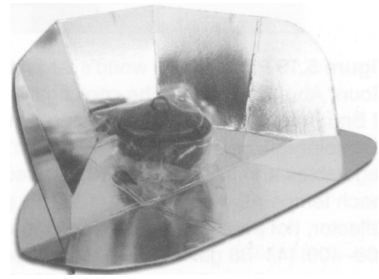


图 5.13　CooKit 平板式太阳能灶

图 5.14　这种所谓的阳光太阳能灶可以自己动手制作（资料来源：相关说明可以在 http://sunnycooker. webs. com 网站上找到）

除了上述几种类型的太阳能灶外，还有一些抛物面碟式和槽式系统等大中型的太阳能炊具，其热蒸汽通过管道传输到厨房用于烹饪，或者冷凝后用于洗涤（见图 5.15 ~ 图 5.19）。

图 5.15　来自孟加拉国的一个家庭正在用一个大的抛物面碟式太阳能灶做饭（资料来源：Creative Commons）

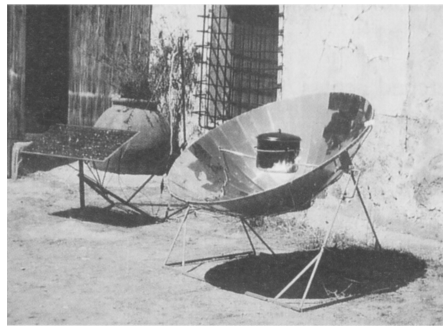


图 5.16　在非洲使用的一款深焦点抛物面碟式太阳能灶。这些图片来自 http://friends.ccathsu.com/bart/solarcooking/parabolic/parabolic_solar_cooker_pg_3_html.htm 网站，网站还提供一个简便的程序，可以利用它来画出任意抛物面的焦点以及教你如何设计一个抛物面碟的详细说明（资料来源：Creative Commons）

图 5.17　把一个碟式卫星电视接收器改装成太阳能灶。图片所示为一个学生正在把铝板固定到碟式卫星电视接收器面盘上来制作太阳能灶。用于支撑锅体的支架是用自行车的轮箍制作而成的。盘的背面也有一个用旧的举重器制作而成的定位支撑系统，以便于定位和调整碟的位置以对准太阳光

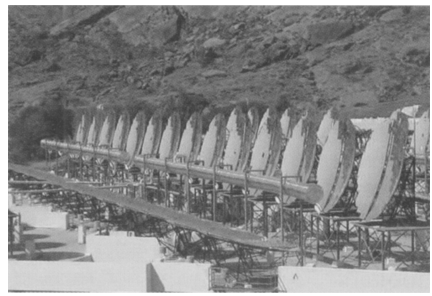


图 5.18　位于印度拉贾斯坦邦的阿布山上的世界上最大的太阳能食堂。这个蒸煮系统是印度婆罗摩库马利和德国 Solare-Bruecke 共同努力的产物。太阳反射镜产生的热量可以蒸煮供 18000 人吃的米饭和蔬菜。其反射器焦点处的热蒸汽温度可达到 650℃（1202℉），有足够的热量供给 200～400L（44～88gal）的大规模的工业锅蒸煮食物。在白天太阳辐射的高峰期，据说这个系统每天可以煮 38500 份食物（资料来源：http://tinyurl.com/y4zbeal）

图 5.19　槽式太阳能灶，主要用于烧烤
（资料来源：Creative Commons）

第6章

光伏发电

电力是我们所知的最常用的一种能量形式，如果可以把辐射到地球的太阳辐射能量的一小部分收集并转化为电能，那将超出我们所有的电力需求。将太阳光转化为电能的方法有很多种，其中一些是利用太阳能的光能，还有一些利用热能。主要的技术包括：

1）太阳能光伏发电（利用太阳光能）。

2）聚焦式太阳能热发电（CSP）（利用太阳热能）。

3）太阳能热发电塔（利用太阳热能）。

4）热电技术（利用太阳热能）。

6.1 光伏发电的简介

光生伏特（通常简称为 PV）这个词来源于希腊词汇 photos，意思为“光”和“伏特”（电压的国际单位，以其发现者亚历桑德罗·伏特的名字命名，见图 6.1）。光伏太阳能组件利用太阳光能发电，没有活动部件，基本不需要维护，并且利用免费能源发电，没有环境污染。

图 6.1 亚历桑德罗·伏特，18 世纪末电学研究的先驱（资料来源：翻拍自埃德加·法斯·史密斯的影集）

本章介绍光伏发电的历史及其基本原理、并网发电系统（也被称为“通用交互”和“连网”式发电）以及一

些其他的应用和最新的发展状况。独立式太阳能发电系统将在下章介绍。

6.1.1 光伏发电的简要历史

1839 年，法国物理学家爱德蒙·贝克勒尔（Edmond Becquerel）（见图 6.2）首次发现了光生伏特效应。他发现当一束光照射在某些金属上时，金属就会发射出一连串的粒子（后来证实是电子）。但是直到 1883 年查尔斯·弗里兹（Charles Fritts）才制作出第一个太阳能电池，它利用硒涂层与金薄层形成结，其效率不到 1%。

实验表明，从金属发射出的电子数量取决于作用于金属的入射光的强度；强度越高，发射出的电子数量越多；但前提是入射光的频率必须高于某个阈值频率，否则无论多强的光都不会激发出电子。当时人们还不知道为什么入射光的频率越高，电子的发射速度越快，直到 1905 年，爱因斯坦揭示出光的量子特性且同时具有波动性和粒子（后来称为光子）性之后，人们才知道其产生的原因，爱因斯坦也因此获得 1921 年的诺贝尔物理学奖。

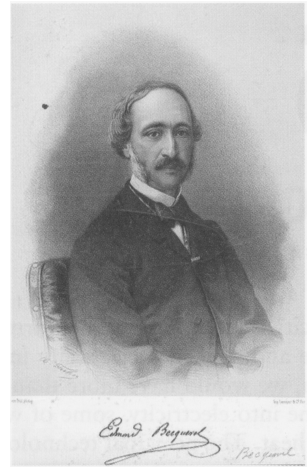


图 6.2 爱德蒙·贝克勒尔（1820—1891）。该石版画由皮埃尔·珀蒂（1832—1885）创作，查尔斯杰雷米富印刷（资料来源：维基共享资源）

1946 年，拉塞尔·奥尔（Russell Ohl）申请并取得了现代结型硅半导体太阳能电池的专利。在 20 世纪 50 年代，美国新泽西州的贝尔实验室在研究半导体和光效应时发展并完善了结型太阳能电池理论，其研制的太阳能电池的转换效率约为 6%。1958 年，这些新发明首次用于为美国第二颗人造卫星“先

锋1号”（见图6.3）的仪器设备供电，从那以后，正是美国和前苏联间展开的太空竞赛促使太阳能电池技术取得了快速的发展。

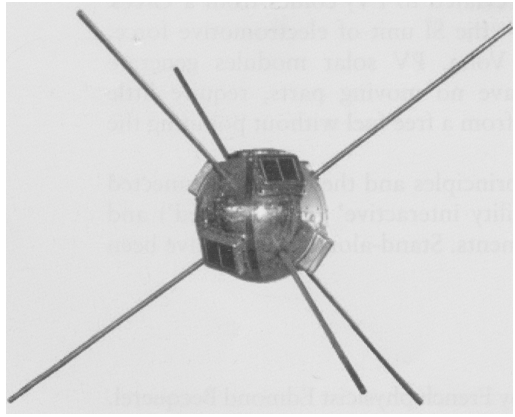


图6.3　先锋1号，世界第四个卫星并且是第一个由太阳能驱动的卫星（资料来源：维基共享资源）

6.1.2　太阳能电池的工作原理

太阳能电池由单元电池阵列组成，单元电池由半导体材料制成，制造方法与晶体管和计算机集成芯片的处理方法与组装工艺类似。最常见的太阳能电池是由硅晶体材料制成的，当然也有许多其他类型（见图6.4）。

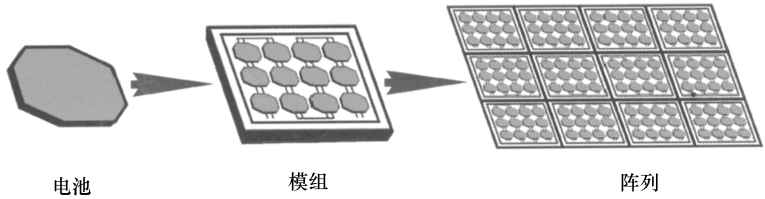


图6.4　硅光伏电池模组是将多个电池连接在一起的阵列，直流输出，功率从几瓦到100多瓦。多个光伏电池模组组合成光伏阵列系统，可用来为众多电子设备供电

1. 硅太阳能电池

一个标准的硅电池由两层硅组成，硅是世界上最丰富的元素之一。当一个光子（光的量子粒子）撞击硅原子，光子的能量就传递给硅原子最外层的电子，并将其激发至更高的能带。实现这个过程所需要的能量值取决于材料的禁带宽度，而禁带宽度又决定了太阳能电池可吸收的太阳光谱的波长范围。通常情况下，由于带负电荷的电子受到带正电荷的原子核的吸引，电子会很快跃迁回原来的能带之中。因此，电池中两层结构设计目的在于以最低能量损耗俘获电子，并在外电路中产生电流。

为了实现这个目标，顶层的硅掺入或注入磷原子，底层掺入硼原子，这样两层分别形成正负电势。顶层跃迁出来的电子被吸引至底层从而在顶层产生一个空位，若该电池与外电路连接形成回路，电池中千百万个与上述电子具有相同状态的电子将会在回路中流动从而产生了电流，两层硅的连接处即所谓的 pn 结之间由于存在反向电场从而在电池两端产生电压。由外电路返回的电子将填充至原来的空位，这个过程就可以重新开始。

除了硅，其他金属和化合物也可以制成有相同性质的太阳能电池，由这些材料制成的太阳能组件已商业化并在持续发展中，稍后将就此进行详细的讨论。目前硅太阳能电池使用最广泛（见图 6.5）。

太阳能电池的光电转换效率取决于入射光频率与制造电池材料组分所决定的禁带宽度之间的匹配程度。如本书引言部分所述，太阳光由不同频率的单色光组成复合光谱。因此一个电池的效率一定程度上取决于电池能够响应的光波的频率范围。能量不足的光子无法激发电子从导带跃迁到价带（光子频率越高，能量越大）；但能量比跃迁阈值能量更大的那些光子跃迁之后，多余的能量以热能的形式损耗掉，这又会导致电池发热，效率降低。此外，太阳能电池可吸收的光谱频率范围越大，电池的光电转换效率越大，可产生的

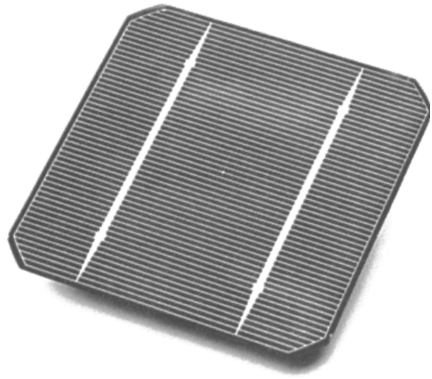


图6.5　单晶硅太阳能电池（资料来源：维基共享资源）

电功率越大。另一个重要的研究和开发领域是降低光伏电池的成本。同样，由于气候条件和地区的平均光照质量的差异，如果太阳能电池组件的特性能够更好地与当地的平均光照质量相匹配，则电池的效率更高。

下面介绍硅太阳能电池的类型。

硅电池可以分为三种类型：单晶、多晶和非晶。这些名称指的是硅晶体的排列形式，它由生长过程决定。

单晶电池是由高纯硅材料制备而成，其光电转换效率高（实验室条件下高达24%），但制造成本也很高。多晶电池是由熔融和浇铸的硅材料制成，材料含有多种晶型，成本稍微便宜些，效率比较低，但却是最常见的硅电池类型，约占市场份额的85%。

2. 薄膜太阳能电池组件

所谓的“薄膜”太阳能电池组件的发展较迟，但现在越来越受欢迎。它们和硅电池的工作原理基本一样，但是结构不同。薄膜组件是在低成本的衬底如玻璃、不锈钢或塑料上沉积一层极薄的光敏材料制作而成的，因此在消费类电子产品包括手机上的应用更具灵活性和实用性。它们比其他类型的电池更能忍受遮光或更高的工

作温度。

薄膜太阳能电池组件比用高成本的晶体制造工艺生产的晶体电池组件的制造成本更低，但其效率也更低，只有 5% ~13%［发电 1kWp 需要 11 ~13m^2（118 ~140ft^2）太阳能电池面积］。因此，为了获得相同的功率输出，所需的薄膜太阳能电池组件的表面积是晶体太阳能电池的 2 倍，有时难以达到这么大的面积。薄膜组件的大小可根据需要的输出电功率制造。目前市面上有三种类型的薄膜太阳能电池组件（根据电池有源区所使用的材料划分）：

1）非晶硅（a-Si）。

2）碲化镉（CdTe）。

3）铜铟硒（CIS）/铜铟镓硒（CIGS）。

非晶硅电池没有晶向，效率较低，但由于使用的原材料更少，价格更便宜，可用于袖珍计算器和手表中。通常以气相外延的方式把非晶硅薄膜沉积在衬底如玻璃、铝或塑料的表面上。商业化的碲化镉和铜铟镓硒薄膜太阳能电池的转换效率约为 10%，碲（用于 CdTe）是一种稀有的物质，而且自然界也没有足够数量的镉、镓来满足大规模的太阳能电池生产。

多结电池（a-Si/m-Si）不是单结结构而是由多个 pn 结串联而成的，其目的是吸收更多频率的太阳光。多结电池中的每个 pn 结使用不同的材料制造，因此具有不同的禁带宽度，这样能够吸收不同波长的光子，目前其实验室外的光电转换效率可以达到 9% 左右，预计将来会更高（见图 6.6 和图 6.7）。

3. 功率输出

光线的照射量决定太阳能电池的功率输出，在晴朗无云的天气下、阳光垂直照射时电池处于最佳工作状态，此时的输出功率最大，该值称为“峰值功率”（瓦特—峰值或 Wp）。

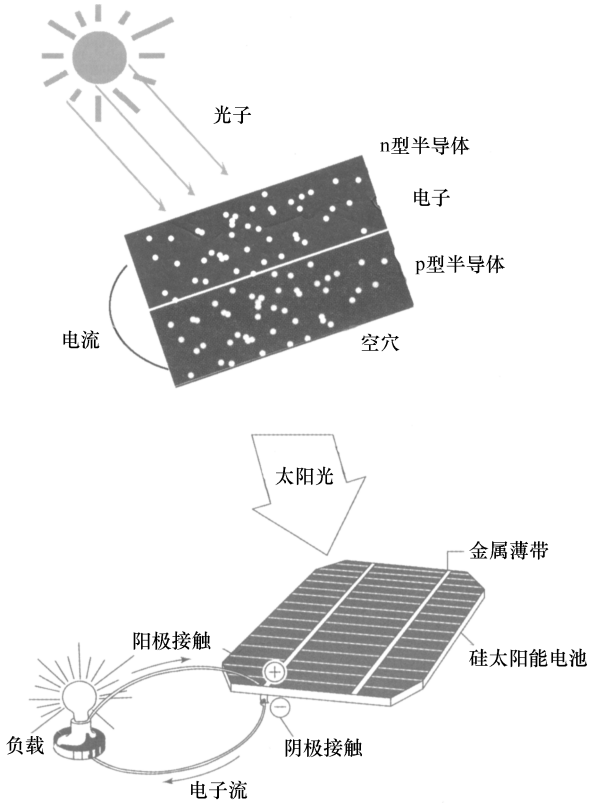


图6.6　光子照射硅太阳能电池，激发出电池pn结的n型层同等能量的电子，电子流向p型层，从而在电池的n和p型层产生电势差。若电池与外电路连接，在回路里就形成电流

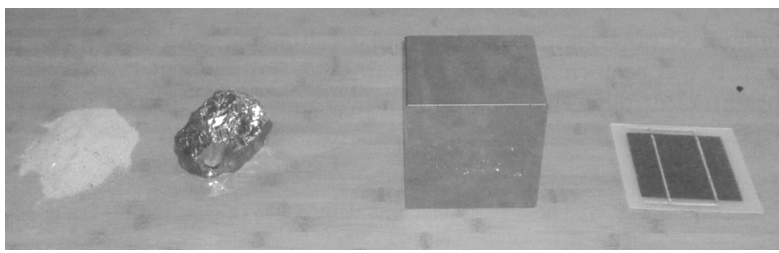


图6.7　生产硅太阳能电池的过程。从左往右依次是：含有硅的沙子，硅料块，正方体硅块以及光伏电池成品（资料来源：Frank Jackson）

专栏 6.1　多晶太阳能电池组件的生产过程（见图 6.8）

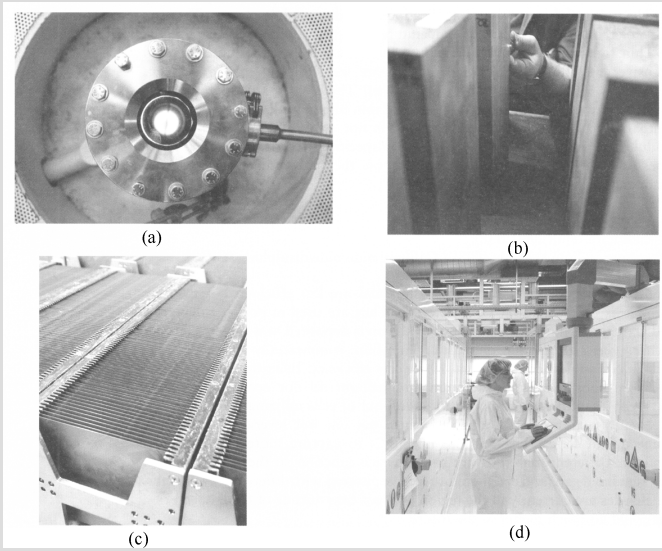
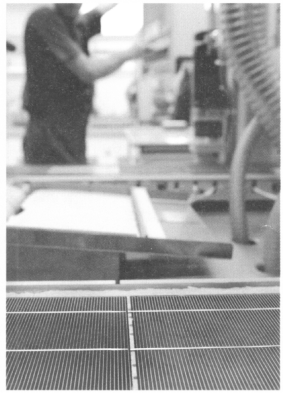
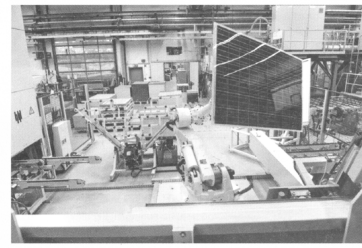


图 6.8　多晶硅太阳能电池组件的生产过程。（a）高纯硅在坩埚中以高于 1400℃的温度熔化；（b）冷却之后，再从坩埚底部熔化硅晶体，形成多晶硅块；（c）~（d）多晶块再锯成方形晶片并用化学法清洗；（e）用磷注入法形成 pn 结使硅能传导电子；（f）在电池表面生长一层蓝色抗反射膜，抗反射膜可减小光的反射损失并作为表面的电学纯化层；



(g)



(h)

图6.8 多晶硅太阳能电池组件的生产过程。(g) 硅电池再横纵向焊接在一起，前一电池的正面电极与下一电池的背面电极相串联，图中为60个电池组成的模组；(h) 电池模组正面以太阳能玻璃或薄膜覆盖，背面用支撑板固定，板上带有插座以引出电压或电流。上述多层结构嵌入铝合金框内，制作完成的模组再进行质量检测（资料来源：www. solar world. de/4341. html）（续）

太阳能电池组件通过在标准测试条件下（STC）的峰值功率输出进行界定。标准测试条件指的是太阳能电池组件工作温度为25℃（77℉）、大气质量（光线需要穿透的大气厚度）为1.5、每平方米的日照功率为1kW。这个标准使得不同型号的电池具有可比性，例如面积为100cm^2 或 10cm×10cm（3.94″×3.94″）、效率为12%的组件，在标准条件下的输出功率为1.2W，即其额定峰值功率为1.2Wp，若面积增大3倍功率也将增大3倍，即3.6Wp，若将10个同样的组件连接使用则会输出10倍的功率（12Wp）。然而，我们真正感兴趣的是整个系统的输出功率，通常情况下它将比额定峰值功率更小，这一点后面将会讨论到（见表6.1、表6.2、图6.9和图6.10）。

表 6.1　不同类型光伏组件在标准测试条件下（STC）发电 1kWp 所需的表面积

材　　料	发电 1kWp 所需表面积
单晶硅	5～7m²（54～75ft²）
多晶硅	6～8m²（65～86ft²）
非晶硅	11～17m²（119～183ft²）
CdTe 薄膜	9～11m²（97～119ft²）
CIS/CIGS 薄膜	8～10m²（86～108ft²）

表 6.2　不同种类光伏电池的效率以及发展现状

电池类型	结构	电池效率（%）	组件效率（%）	发展现状
单晶硅	均匀的晶体结构——单晶	24	14～20	工业化生产
多晶硅	多晶结构——可以观察到多种晶体结构	18	13～15	工业化生产
非晶硅	原子不规则排列的薄膜技术	11～12	5～9	工业化生产
碲化镉	薄膜技术	17	9～11	工业化生产
铜铟硒	薄膜，不同结深位置生产方法	18	10～12	工业化生产
砷化镓	晶体电池	25	—	只供特殊应用（如航天器）
砷化镓、锑化镓和其他	串联式（多个 pn 结）电池，不同 pn 结对不同波长的光敏感	25～31	—	研究和发展阶段
有机太阳能电池	电化学原理	5～8	—	研究和发展阶段

注：需要注意的是，从应用角度评价系统的性能应以组件效率为准。

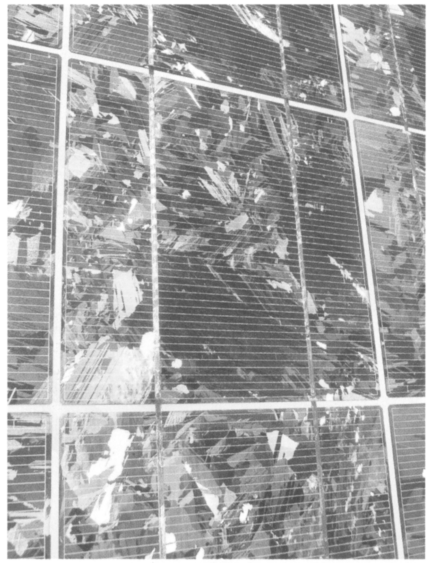


图6.9　位于层压板背衬的多晶硅晶片
（资料来源：维基共享资源）

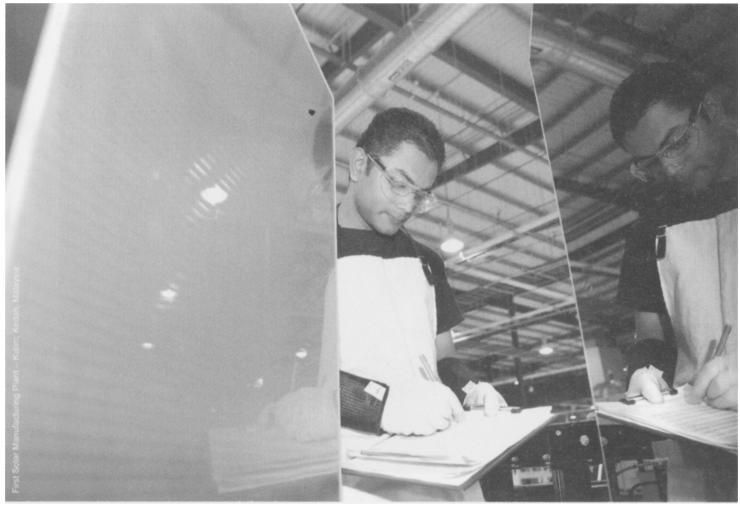


图6.10　薄膜生产车间内部（资料来源：© First solar）

6.2 光伏发电的应用

6.2.1 并网发电系统

光伏发电最常见的使用形式是与电网并网或供本地使用，这样的系统被称为并网发电、交互式供电或并网光伏系统，规模应有尽有，从家用规模到大型发电站。接下来按规模大小顺序分别进行介绍。

1. 家用系统

与电网并网的家用太阳能电池组件在没有电力输出，或电力供应不足时，以电网的电力作为备用电力供应。若其输出的电力过剩，则将其并入电网，使电表反转。在此类系统中，一个同步或电网换向整流逆变器将光伏阵列中的直流电转换为电压和频率能满足家用电器和当地电网要求的交流电（见图6.11）。

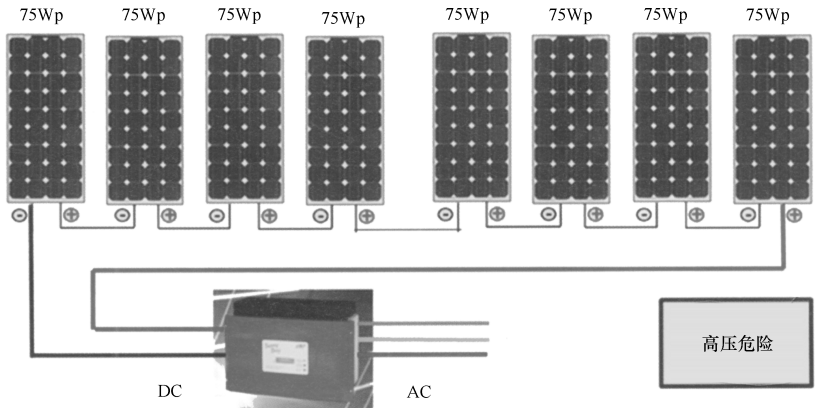


图6.11 多个组件组成的太阳能电池阵列系统与逆变器的连接示意图

系统的规模通常和业主的预算以及屋顶的可用空间有关（见图6.12～图6.14）。目前这种规模的太阳能电池发电系统的发电量只能部分满足家庭年平均总电力消耗。安装该类系统的业主通常会

图 6.12　安装在屋顶上、位于一些光伏电池组件下面的两台逆变器。逆变器的类型、尺寸和数量取决于光伏阵列的配置情况、本地电网电压和其他因素（资料来源：© chris Twinn）

(a)

图 6.13　位于英国的一幢建筑房子用光伏电池一体化屋顶代替传统屋顶（资料来源：© Chris Twinn）

(b)

图 6.13　位于英国的一幢建筑房子用光伏电池一体化屋顶代替传统屋顶（资料来源：© Chris Twinn）（续）

图 6.14　位于德国柏林的住宅船舶的光伏板和绿色屋顶（资料来源：© Frank Jackson）

更加关注其家庭用电量，一般家庭在电器和照明上每年人均使用1000～1500kWh，在此功率范围内最常见的组件是单晶和多晶硅太阳能电池组件。虽然前者的效率更高，但是在实际应用中两种系统的输出量没有多大差别，只是同为1kWp的多晶阵列比单晶阵列的表面积稍微大一些。

专栏6.2 美国威斯康星州的主动式和被动式建筑

也就是第4章里所提及的明尼苏达州乔和艾伦·斯坦科维奇夫妇的房子。房子由电力公司和光伏并网发电系统共同提供电能，光伏发电系统的发电量为3kWh，用不完的电由当地电网回购，没有太阳的时候，房子由电网供电。光伏发电系统于2004年6月开始运行，其每年发电量几乎可以满足该房屋的基本用电需求。光伏发电系统共使用24块58W组件和4块100W组件，共4.2kWp，有两台逆变器。2009年冬季和春季的发电量监控数据是：1月份（346kWh），2月份（417kWh），3月份（445kWh）和4月份（496kWh）。

更详细信息可参阅http：//daycreek.com。

利用太阳能电池预计可以输出多大的电力？在某个纬度上的地区如英格兰，每1kWp额定峰值功率输出的组件每年可发电约600～800Wh；在德国北部，这个数字约大于850Wh；而在德国南部可以上升到1kWh；在美国加利福尼亚州南部，每年可发电1800kWh；在加利福尼亚州北部、澳大利亚和印度（该地区每年平均有300个晴天，每天有4～7kWh/m^2的太阳辐射量）输出量可达到1600～2000kWh。英国牛津大学最近的一个监测试验表明，即使安装于朝北屋顶的太阳能电池组件的发电量也可达到400Wh/kWp，当然这一数值并不适用于所有情况。

计划安装太阳能光伏发电系统时，应该请多家安装和设计商进行适当的评估和建议。光伏组件的使用寿命可以达到30年以上，

但是其输出功率会随时间缓慢下降，而下降的速度取决于电池的类型。单晶和多晶硅组件一般使用 25 年后还能保证有 80% 的最大输出功率。

（1）系统设计

除了组件，一个典型的太阳能光伏发电系统还包括与并网发电不同的用于独立（非并网）发电系统的逆变器、控制器、断路器、电表和熔断器。若要求供电电网断电时系统还能供电，则该系统还应另外有与蓄电池连接的逆变器和继电器控制器等，如图 6.15 和图 6.16 所示。

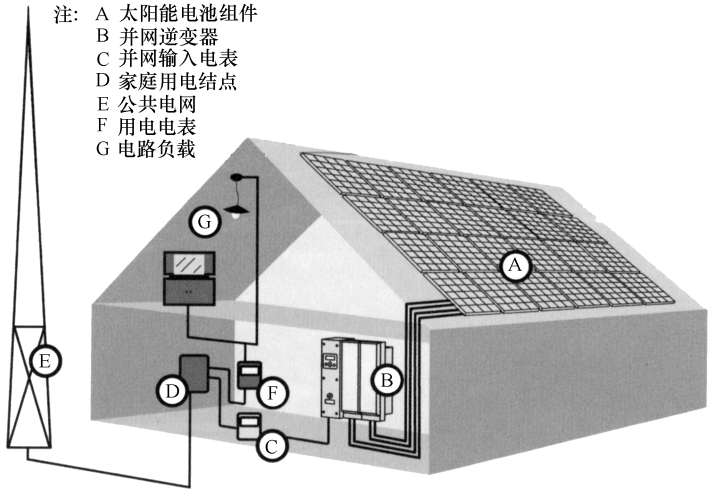
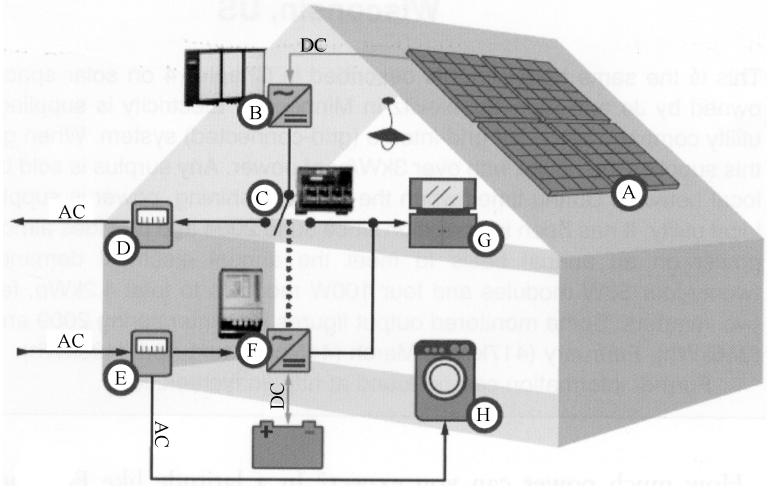


图 6.15　光伏并网发电系统的组成部分。光伏组件通过并网逆变器产生与电网同等质量的交流电供家庭用电器使用，盈余的电能将通过并网输入电表输送到本地电网中。当家庭的用电量大于光伏电池的发电量，例如晚上的时间段，电能通过用电电表从电网输入。供电企业将根据家庭的耗电量和供电量的差值并以事先签订好的用电和供电价格对该家庭收取或支付电费（资料来源：Steca）



注：

A　太阳能电池组件
B　并网逆变器
C　继电器模组
D　并网输入电表
E　用电电表
F　正弦波逆变器
G　蓄电池供电负载
H　非蓄电池供电负载

图6.16　带有备用蓄电池的并网发电系统的组成部分，该系统可以在太阳能电池模组不工作如夜间或者电网停电的情况下通过备用电池供电，它能保护如医院里或通信上的重要设备。当电网停电时系统的继电器可以自动将交流负载切换到与蓄电池连接的逆变器上（资料来源：Steca）

需要格外注意的是，给定的太阳能电池组件阵列每年可产生的电力供应取决于多种因素，特别是组件的类型和安装的位置。一个系统的发电量可以参照组件制造商提供的年度额定发电功率来进行计算。

所处位置的日晒数据以该地区全年每平方米的平均能量大小（单位：kWh/m^2）给出，经简单的计算可以估计出太阳能光伏电

池的年输出功率（见图 6.17）。每个光伏组件的大概年发电量可由下式给出：

通过PVGIS软件对光伏系统发电量进行的估算
坐标:北纬52°31′24″,东经13°24′41″, 海拔:40m

光伏系统额定功率：1.0kW(硅晶体结构)
预计由于环境温度所产生的能源损耗:8.1%(运用当地环境温度数据进行计算)
预计由于光线反射所产生的能源损耗：3.0%
其余损耗(如电缆或逆变器等造成的损耗)：14.0%
相连光伏系统能源损耗：23.3%

	固定后的系统:切斜角=36° 偏向角=0°(已经设定为最佳朝向)			
月份	Ed	Em	Hd	Hm
1月	0.88	27.4	1.04	32.4
2月	1.71	47.9	2.07	57.9
3月	2.28	70.7	2.82	87.4
4月	3.19	95.8	4.14	124
5月	3.87	120	5.17	160
6月	3.44	103	4.69	141
7月	3.65	113	5.00	155
8月	3.43	106	4.68	145
9月	2.64	79.3	3.47	104
10月	1.92	59.6	2.43	75.2
11月	1.07	32.0	1.29	38.8
12月	0.63	19.6	0.75	23.2
年平均值	2.40	72.9	3.13	95.3
全年总量		875		1140

Ed：系统每天平均产生的电能(kWh)
Em：系统每月平均产生的电能(kWh)
Hd：每平方米光伏系统每天平均所能接收到的总辐照量(kWh/m^2)
Hm：每平方米光伏系统平均所能接收到的总辐照量(kWh/m^2)

(a)

图 6.17　由 PVGIS 软件计算得到的德国柏林和亚美尼亚使用同一个 1kWp 光伏电池阵列系统的发电量的估算值，PVGIS 软件的详细介绍请参阅第 10 章（资料来源：使用 PVGIS 在线软件获得的数据）

光伏并网发电系统的工作情况

通过PVGIS软件对光伏系统发电量进行的估算
坐标:北纬52°44′7″,东经13°21′33″, 海拔:61m

光伏系统额定功率：1.0kW(硅晶体结构)
预计由于环境温度所产生的能源损耗:12.7%(运用当地环境温度数据进行计算)
预计由于光线反射所产生的能源损耗：2.9%
其余损耗(如电缆或逆变器等造成的损耗)：14.0%
相连光伏系统能源损耗：14.0%

	固定后的系统:切斜角=45° 偏向角=25°			
月份	Ed	Em	Hd	Hm
1月	0.82	25.4	1.01	31.4
2月	1.60	44.9	2.05	57.3
3月	2.12	65.8	2.76	85.7
4月	2.96	88.9	4.06	122
5月	3.57	111	5.04	156
6月	3.15	94.6	4.52	136
7月	3.34	104	4.82	150
8月	3.16	97.9	4.56	141
9月	2.48	74.4	3.44	103
10月	1.80	55.8	2.39	74.1
11月	1.00	30.1	1.27	38.2
12月	0.61	18.9	0.75	23.2
年平均值	2.22	67.6	3.06	93.1
全年总量		811		1120

Ed：系统每天平均产生的电能(kWh)
Em：系统每月平均产生的电能(kWh)
Hd：每平方米光伏系统每天平均所能接收到的总辐照量(kWh/m^2)
Hm：每平方米光伏系统平均所能接收到的总辐照量(kWh/m^2)

(b)

图6.17 由PVGIS软件计算得到的德国柏林和亚美尼亚使用同一个1kWp光伏电池阵列系统的发电量的估算值，PVGIS软件的详细介绍请参阅第10章（资料来源：使用PVGIS在线软件获得的数据）（续）

组件的额定输出(Wp)×峰值日照时数(每年)×0.75(性能比)=发电量(kWh/年)

性能比取决于组件工作温度、系统损耗和其他因素，安装良好的并网发电系统的性能比通常为0.7~0.8。

例如，1500W×900峰值日照时数/年×0.75=1012500Wh或1012kWh（近似值）。

除了安装位置有效的太阳辐射年总量和太阳能电池的峰值功率瓦等级因素，决定太阳能光伏电池发电系统的规模及其实际的最终输出功率的其他因素还包括：

1）方向（方位）（-90°为东，0°为赤道，90°为西）。

2）固定安装（非跟踪式）的组件相对于水平面的倾斜角度。

3）组件的能量转换效率。

4）组件效率受温度影响的程度。

5）与大气的清晰度和太阳路径有关的因素。

6）一年中每天的任何时候是否有任何障碍物投影在组件上。

7）系统的效率，如逆变器和布线的选择。

8）安装结构的类型——固定式或追踪式（追踪式可以提高发电量）。

考虑上述所有因素之后，最终的输出功率可能是太阳能电池组件额定功率的60%～70%，因此良好的设计和安装是十分重要的（见表6.3）。

表6.3　方位以及倾角对光伏发电的影响

方位	倾角	发电量/（kWh/m²/天）	与最优条件的差值（%）
南	35°	3.00	最佳位置
南	垂直	2.18	17
南	水平	2.63	12
东/西	35°	2.46	18
东/西	垂直	1.63	47
东/西	水平	2.63	12

注：根据RETscreen软件（详见第10章）模拟的结果，当光伏电池垂直于墙面安装在英国曼彻斯特某座没有阴面的公寓大楼时，光伏阵列发电量减少了17%，而当光伏电池朝向东西方向时，发电量几乎减少了一半

专栏 6.3　关于光伏电池安装位置的小贴士

1）安装在全年任何时间无阴影的位置。

2）根据所处的经纬度安装于与太阳成合适角度的位置（并网系统和离网系统不一样）。

3）朝向赤道安装（通常会有例外）。

4）安装在易于清洗和维修的地方。

5）采用经久耐用、耐腐蚀的材料制成的支架。

6）高温会降低光电电池组件的效率，因此组件背面应留有适当的通风空间以加强散热。

图 6.18 给出了为获得最佳的功率输出，并网发电系统在不同纬度时对应的倾斜角度的粗略值。

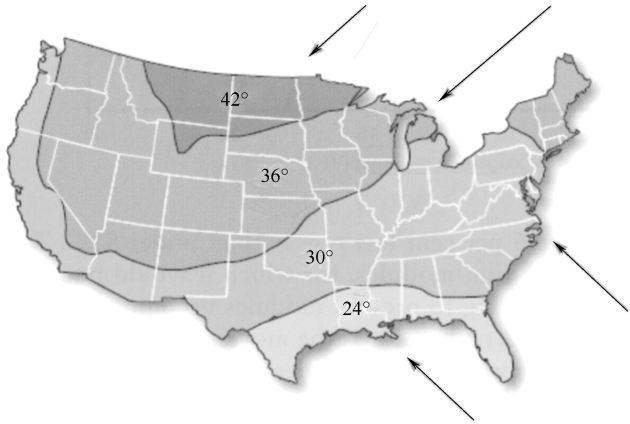


图 6.18　美国能源部《太阳能热系统和太阳能光伏发电最佳实践指南》公布的美国并网光伏发电系统的最佳安装倾斜角。安装角度的选择还可通过在线软件 PVWatts（北美地区）和 PVGIS（欧洲地区）获得（参见第 10 章）。这些数据都假设光伏系统是朝向正南方的。而对于离网型光伏发电系统或者混合型光伏发电系统，最佳角度是不一样的

（2）温度和组件的性能

太阳能电池的性能受到温度的影响，如图 6.19 所示，超过 25℃（77 ℉）时，温度每升高 1℃，输出功率就下降约 0.5% ~ 0.6%，38℃（100 ℉）时，单晶硅太阳能电池组件输出功率比标准测试条件下降低 6%。而同样条件下，薄膜太阳能电池组件下降幅度没这么明显，仅为 2%。可以采取多种措施防止电池组件在炎热的天气或气候下过热，其中很重要的一点是要确保电池组件背面的空气流通。如果空气不流通，组件就会过热，因此确保组件背面的通风十分重要。若电池组件安装在机架上，空气就可以自由流通；若组件与建筑一体化安装，即完全嵌入建筑的墙面或屋顶结构中，那就必须在组件后面加强通风。如果系统处于多风的地区，就能降低组件的温度，这将有助于稍微提高组件的效率。

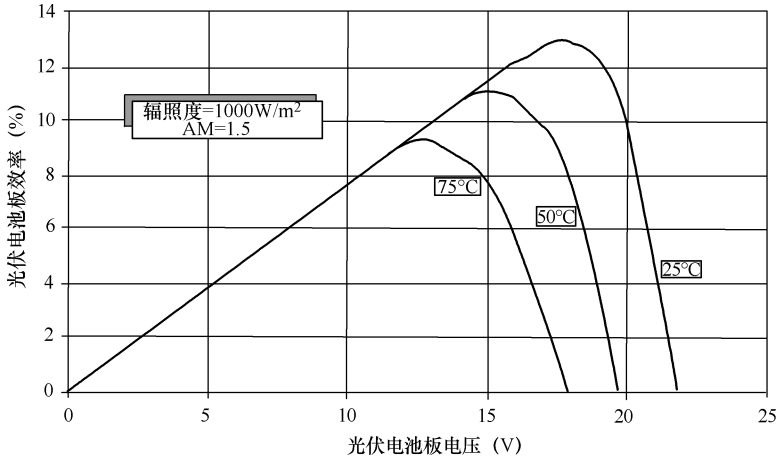


图 6.19　温度对光伏电池的性能的影响。三种情况下光伏电池（对应三条曲线）接收的能量均为 1000W/m²，但是温度越高，电压下降得越快，输出功率越小

（3）太阳能电动热收集器

一种新型的混合式太阳能收集器可以解决温度对太阳能电池组件的影响，这种混合式太阳能收集器集成了太阳能光伏发电和太阳

能热技术，称为“PV/T 系统”，这种系统具有其他潜在的优势。国际能源署（IEA）认为 PV/T 系统每单位屋顶面积的发电量大于相同面积下独立安装的光伏电池组件和生产以及安装成本可能更低的太阳能集热器。IEA 认为，其原因在于引入太阳能热系统有助于冷却光伏电池组件，因此在 45℃（113 ℉）条件下，相对于同样的独立光伏系统，其效率可提高 20%。各种商业化的太阳能集热器均可以用于 PV/T 系统中，包括液体和空气集热器。例如，一个解决方案是将光伏电池组件安装于顶部，另一个太阳能空气集热器安装于光伏电池下面，集热器面板上装有面积较小的光伏电池为通风系统供电，通风系统可以把新鲜的热空气送入房屋内（见图 6.20）。PV/T 系统也可使用跟踪式太阳能集热器，如使用带有单轴跟踪模块的聚焦型槽式太阳能集热器，但最常见的太阳能集热器是可与屋顶一体化安装的传统真空管太阳能集热器。

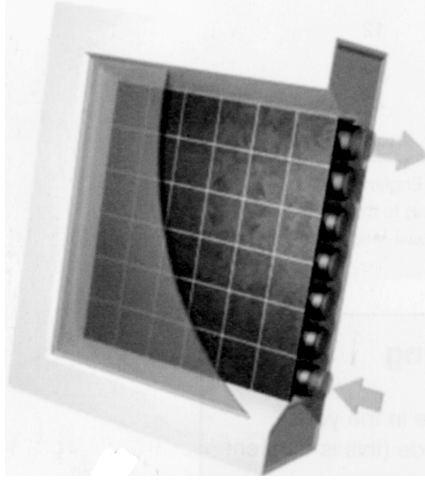


图 6.20　基于流体制冷的平板太阳能电热联用模块的横截面。光伏电池置于可为电池降温的太阳能集热器之上（资料来源：© IEA-SHC）

专栏 6.4　太阳能电热联用光伏墙系统（见图 6.21）

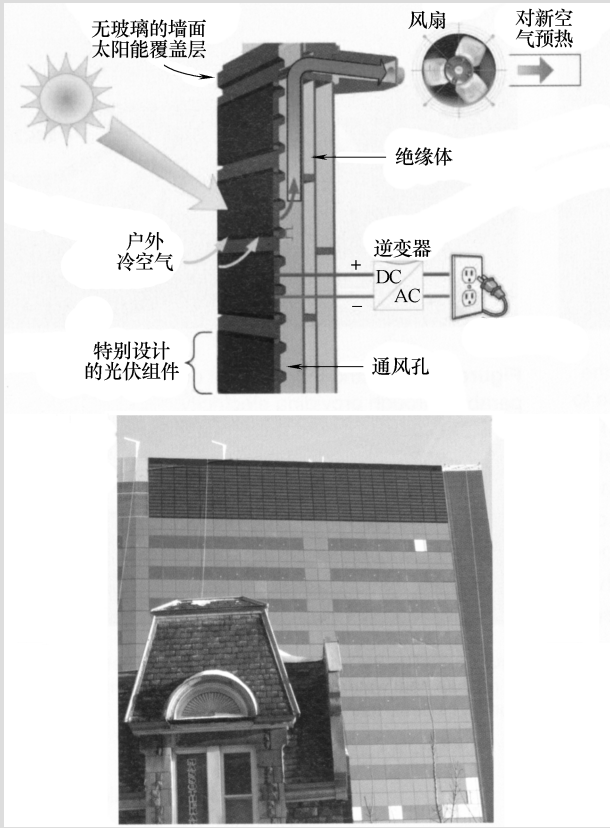


图 6.21　加拿大蒙特利尔市的约翰莫森商学院采用 24.5kWp 的建筑一体化光伏光热系统（BIPV/T），该系统利用高效率分散式进风口收集光伏板产生的热量，预热过的新鲜空气以 424650L/min（15000ft^3/min）的速度进入室内供暖空调系统以满足部分的供暖需求并可用于冷却光伏板。系统安装者表示该系统每年可以产生大约 100MWh 的热量，相比于没有冷却系统的光伏板，该建筑安装的 288m^2 的光伏板的效率在晴朗、寒冷的气候条件下可以提高达 5%（资料来源：NSERC 太阳能研究网（SBRN））

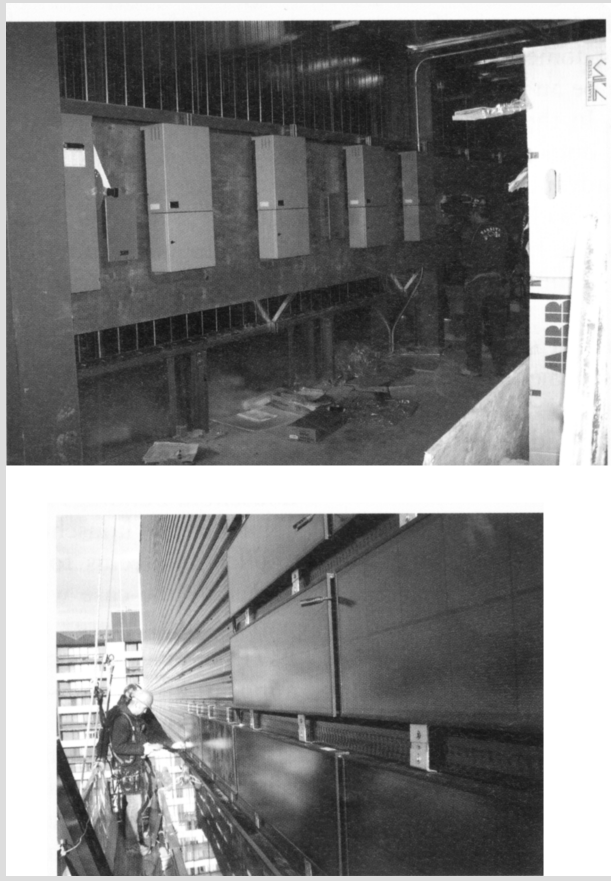


图6.21　加拿大蒙特利尔市的约翰莫森商学院采用24.5kWp的建筑一体化光伏光热系统（BIPV/T），该系统利用高效率分散式进风口收集光伏板产生的热量，预热过的新鲜空气以424650L/min（15000ft^3/min）的速度进入室内供暖空调系统以满足部分的供暖需求并可用于冷却光伏板。系统安装者表示该系统每年可以产生大约100MWh的热量，相比于没有冷却系统的光伏板，该建筑安装的288m^{2}的光伏板的效率在晴朗、寒冷的气候条件下可以提高达5%（资料来源：NSERC太阳能研究网（SBRN））（续）

国际能源署（IEA）PV/T 工作组认为这是一个非常有前景的技术，它有极大的潜力可应用于目前占据市场绝大多数份额的太阳能集热器，包括家庭热水系统。从短期看，由于每个家庭可利用的屋顶面积有限，多户型建筑可能是 PV/T 一个很重要的市场；就中长期而言，最有前景的应用在于家用热水系统和空间供暖系统，特别是对于旨在利用太阳能满足大部分能源需求的先进低能耗住宅而言情况更是如此。热泵和 PV/T 系统的结合同样很有前景。从长期来看，国际能源署认为 PV/T 系统在工商业、农业等方面还有很大的商业应用前景，它可用于诸如太阳能冷却系统中。

为此，必须加快性能和可靠性方面的标准化制定过程，同时还要专门针对这种混合技术提供资助方案。安装成本需要降低，将 PV/T 系统合并的建筑设计程序同样必须简化。到目前为止，国际能源署（IEA）已经安装了一些示范项目（见图 6.22 和图 6.23）。目前来看，PV/T 市场份额还非常小，虽然在技术上还难以解决不

图 6.22　光热一体化光伏组件和集热器，集热器加热光伏组件下的水管中的水，同时还可以冷却光伏组件以改善其性能（资料来源：© IEA）

同季节的不同需求，但在理论上这是一个很吸引人的构想。另外，PV/T 系统的安装人员还必须具有对应国家的电气和管道/供暖标准的相关资质。

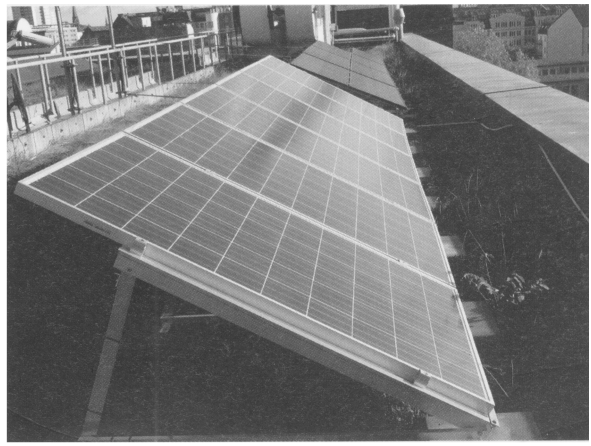
图 6.23　用于发电的抛物线槽式电热联合收集器
（资料来源：© IEA）

2. 太阳能光伏发电的财政支持

通常情况下，向供电企业购买电力与把电力卖给供电企业的价格是不一样的，一些国家已经出台了上网电价（FITs）政策，即以超过现行电费的价格向利用太阳能发电的企业购买其并入电网的电力。这样的补贴政策可以激励人们安装可再生能源发电系统以缩短其投资回收周期。一些国家如英国政府甚至对所有的可再生能源发电进行补贴，无论其是否并入电网。已经出台这种补贴政策的国家如德国，安装家用太阳能光伏发电系统的数量出现了大幅的增长，同时该领域提供的工作还间接地提升了该国的就业率

(见图 6.24)。然而一旦该补贴方案突然撤销，如 2009 年西班牙所做的那样，该行业将会萎缩。FITs 的资金不是来源于国家税收收入就是来源于社会平均电费的涨价，人们已经开始质疑这种政策的社会公平性。(见表 6.4)

(a)



(b)

图 6.24　德国柏林可再生能源学院安装于屋顶的并网交互式光伏系统，该系统由 3 个 1kWp 的光伏列阵组成。(a) Solon Blue 230/7 型 200Wp 多晶硅组件；(b) Sunset TWIN 140 型 140Wp 多结硅薄膜组件

(c)

(d)

图6.24 德国柏林可再生能源学院安装于屋顶的并网交互式光伏系统，该系统由3个1kWp的光伏列阵组成。(c) Inventux X115型115Wp非微晶叠层(α-Si/μc-Si)组件；(d) 3个SMA Sunny Boy inverter生产的SMA 1100型逆变器，一个逆变器对应于三相电中的一相。系统监测信息通过电信线路连至学院办公室，选用不同的光伏阵列类型目的在于培训学生。更多信息尽在www. renac. de. (资料来源：(a)~(c)：Frank Jackson，(d) Alberto Gallego)(续)

表 6.4　世界范围内的太阳能电费价目表

（根据价格和年限排序，价格为 2010 年 2 月的数据）

地区	应用	年限	电价/（欧元/kWh）	电价（×1.413）/（加拿大元/kWh）	电价（×1.359）/（美元/kWh）
意大利	屋顶式	—	0.54	0.763	0.734
韩国	>3kW	15	0.566	0.8	0.77
法国	建筑一体式	20	0.42	0.593	0.571
德国(2009)	屋顶式	20	0.43	0.608	0.585
捷克	—	15	0.487	0.688	0.662
英国	≤10kW(新)	25	0.4082	0.5479	0.5168
西班牙(2007)	<100kW	0	0.34	0.48	0.462
澳大利亚	<5kW	12	0.46	0.65	0.625
加拿大安大略省	—	20	0.568	0.8	1.09
美国华盛顿州①	州制造	8	0.846	1.195	1.15
美国加利福尼亚州①	商用	5	0.371	0.681	0.504
南澳大利亚州①	住宅	5	0.29	0.41	0.394

① 净计量值。

6.2.2　建筑一体化光伏发电和光伏建筑

根据建筑的位置和朝向，光伏发电组件可以安装在建筑的屋顶、外墙面、飞檐和窗户的突出位置上。新建或翻修建筑时，将光伏发电组件作为上述建筑结构的组成部分进行一体化安装往往是最经济的安装方式。光伏发电组件和系统的额外成本在一定程度上可通过减小建筑构件的使用量而得以抵消（见图 6.25）。为了得到最佳的投资回报率，光伏发电系统应该与建筑进行一体化设计，使得建筑的总体能源消耗降至最低，也就是说，不应等建筑建好之后再简单地把光伏发电系统“连接”到建筑物上。

图6.25　德国弗莱贝格的以太阳能组件为屋顶的房屋（资料来源：德国可再生能源信息门户）

目前已商业化的光伏发电组件包括：特别设计的组件、屋顶光伏面板、立式拼接金属屋顶光伏面板以及覆层式光伏面板产品等。一些企业如日本的太阳能光伏企业已经致力于收购房产开发商或建筑公司，或是和这类公司组成战略联盟以便于推广太阳能光伏发电技术。特别需要注意的是，必须正确安装这些产品，以确保雨天时不会漏水、不会降低建筑物的隔热性能、产品必须具备一定的防火等级。

对已安装光伏发电的一体化建筑和利用太阳能光伏发电组件对外墙改造的建筑进行独立监测的还很少，但是相关的研究已表明光伏发电组件产生的电量比设计师预测的要少。可能的原因有几个：安装位置不佳，包括朝向不好、倾斜角度不好或被阴影遮盖；没有保证光伏发电系统工作于最佳状态的控制软件或适当的控制逻辑；设计团队过于乐观地估计住户对该系统的管理能力以及低估了住房的能源消耗量；逆变器选择不恰当；组件和逆变器不匹配。

光伏发电系统必须具有不间断的简单的监控系统以确保出现故

障时能快速地识别出故障源以便于排除故障。特别需要注意的是，系统的接线必须具有高标准的耐候性和密封性，以避免对室内空气质量和温度控制产生影响（见图 6.26～图 6.28）。安装工作应该由具有适当经验和资质的承包商完成。英国政府对已安装光伏发电系统调查显示，“即使是约为 1.6kWp 的小规模光伏发电系统也可以满足相当大部分的室内用电需求，大多数系统能提供 20%～80% 的能源需求，平均值为 51%。”，调查还显示：“为了尽可能地利用光伏发电系统对建筑物的电力荷载供电，很重要的一点是要把光伏发电技术与其他可再生技术和节能措施结合使用，可能还需要对住户进行适当的培训。”调查还建议光伏发电系统的购买者要求供应商提供

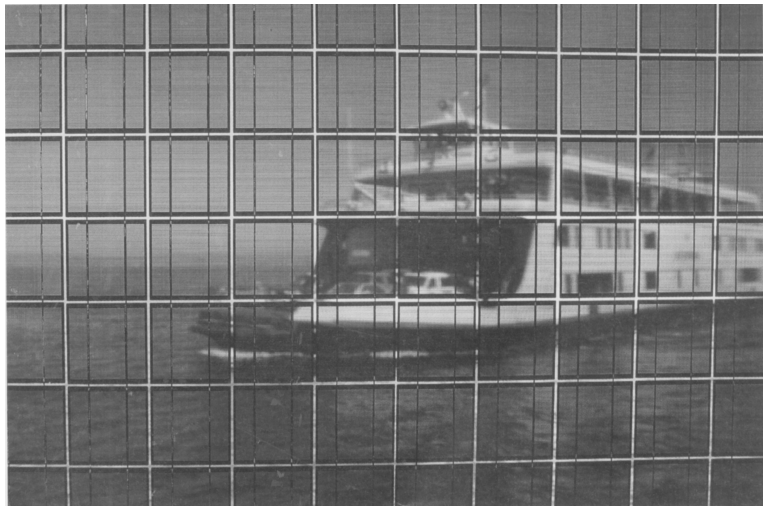


图 6.26　德国港口建筑的透明薄膜太阳能组件形成的阴影能防止室内温度过高和室内光线过强的问题，同时还能生产电能。从室外很难看到建筑内部，但是从室内可以清晰地看到室外情况。这些组件可做成无框架层压板并可作为建筑要素使用，通过激光加工技术在组件上刻出方形凹缝以达到所需的透明度，透明度为 10% 时的光电效率仍可达 13.8%（资料来源：BSW-Solar/Sunways）

其光伏发电系统性能等级的相关证书[㊀]，这样的证书正逐渐成为购销合同的一部分。

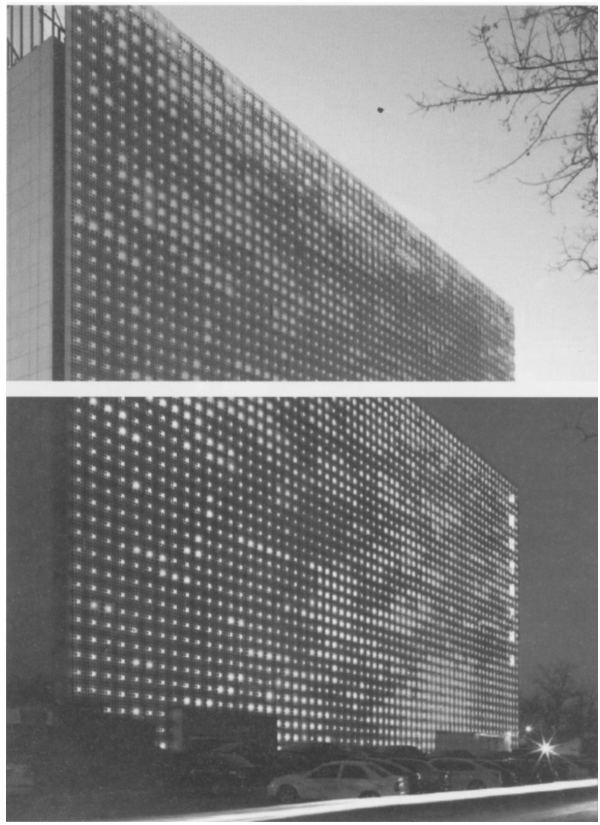


图 6.27 北京西翠娱乐中心的零耗能多媒体玻璃幕墙，该面多媒体墙上的 LED 显示屏由内嵌在玻璃幕墙内的太阳能电池供电，太阳能电池白天收集太阳能，晚上则为多媒体墙的数码艺术提供能源（资料来源：Solarway）

㊀ E. Rudkin，J. Thornycroft and S. Matthews，PV Large-Scale Building Integrated Field Trial Second Technical Report-Monitoring Phase，UK Department for Business，Enterprise and Regulatory Reform，London，2007.

图 6.28　安装于德国柏林中央火车站屋顶上的半透明太阳能电池（资料来源：BSW-Solar/Langrock）

根据国家的规划发展和政治意愿，建筑一体化光伏发电在某些国家比在其他国家更有前景。韩国政府希望到 2012 年有 10 万幢房屋和 7 万幢公共/商业建筑物配备光伏发电系统；根据全球气候变化协议，其中一些较大的项目将有资格申请清洁能源发展机制（CDM）认证。中国也正在稳步推进中，2006 年深圳市立法通过的一项节能建筑法案意味着那些不能使用太阳能的建筑工程必须得到政府特许才能投放市场。目前深圳建设局预期在所有新建筑中的 20% 安装光伏发电系统，50% 配备太阳能热水器系统。2010 年江苏省安装了 50MW 的建筑物和屋顶太阳能设施，包括 40MW 的屋顶太阳能项目。本文撰写期间，他们还计划在 2011 年进一步安装 200MW，其中 180MW 为屋顶太阳能项目。

6.3　成本效益

6.3.1　温带地区

太阳能光伏发电的成本正以较快的速度下降。在太阳能并网发电补贴政策实行最久的德国，2010 年太阳能光伏发电装机的成本约为 3250 欧元/kWh，计算时假定德国中部每千瓦光伏电池每年的发电量为 500～900kWh，并减去了增值税（VAT）以及包括保险费和考虑到组件性能逐年衰减所产生的维护费等费用之后的成本。德国更南部地区的安装成本则会更低。

专栏 6.5　建于美国加利福尼亚州的接近零能耗建筑群（见图 6.29）

图 6.29　美国加利福尼亚州接近零能耗建筑群俯视图（资料来源：© IEA 和 Consol 公司）

该特色房地产项目于 2003 年开始建造，位于美国加利福尼亚州的沃森维尔市，共有 177 栋独立的住宅、80 栋独立洋房以及两栋带有 132 套公寓的公寓大楼。所有建筑的朝南屋顶都

被装上了单晶硅太阳能电池模块，每千瓦装机每年能够产生约1400kWh的电量，每个住宅单元的太阳能电池功率为1.2～2.4kW。这个项目是凯伦房地产开发公司众多“零能耗住宅计划”中的一项，该公司设计的住宅通常包含了许多高效利用能源的相关设计，这些设计与太阳能模块相结合为用户减少约90%的能源支出费用。

对于使用太阳能光伏发电的不同国家，很重要的一点是应该从政策角度而不是从经济利益方面来对该技术进行价格补贴并采取其他鼓励机制，只有这样，政府在支持不同类型可再生能源、鼓励提高能源效率等方面才能够做出明智的决策，最大限度地发挥补贴款的效用。例如，如果补贴的首要目标是减少碳排放，那么评价指标应为每支出一美元的碳回收周期。

例如，英国的一项研究对伦敦一个住宅区里面建筑一体化的屋顶光伏发电系统和理论上的太阳能热力系统进行比较后发现，太阳能热力系统的碳回报期为2年，而建筑一体化光伏发电系统为6年。简单地以当前的能源价格计算，两种系统的经济回收周期均为50年，若能源价格以每年增长10%的速度计算，则屋顶光伏发电系统的经济回收期将缩短为30年以下。该研究发现，大体上采用建筑一体化屋顶光伏发电系统来减少CO_2排放量的成本为196英镑/t，单独采用太阳能热力系统的成本为65英镑/t，而社区太阳能热力系统的成本为38英镑/t，作为比较，目前的现货市场中CO_2的价格约为15英镑/t[㊀]。这意味着安装社区太阳能热力系统具有最高的投资回报，这种规模的太阳能热力系统的日常管理费用较小、技

㊀ B. Croxford and K. Scott, Can PV or Solar Thermal Systems Be Cost Effective? PhD thesis, London, 2008.

术相对简单。

话虽如此，现在仍有许多社区规模光伏发电工程的案例。这些区域性规模而非独幢建筑规模的工程，由于其系统的整体建造成本的降低，通常能够获得最好的投资回报和最少的碳排放量。智能电网的运营、峰值负荷的减少、可再生能源配额制和系统损耗的减少都为开发商带来更多的净增值。不管商业社区还是住宅社区，更紧密的商业负荷都有助于电网总负荷运行曲线更平滑，并且可以优化光伏发电使之就地使用。而农村使用高阻抗电网，可能需要额外的电网应对措施。最大规模的社区光伏发电项目是荷兰的太阳城（Stad van de Zon），它由超过3500幢住房组成，发电量约为5MW。就发电量而言，日本的Pal Town Josai-no-Mori（553所房屋，2160kW）是第二大社区光伏发电项目，而房屋数量最多的社区光伏发电项目为澳大利亚悉尼的奥运村（935所房屋，857kW）。处于温带气候的日本有一个最高水平的社区光伏发电工程，许多光伏电池建在独立式住宅上，也有一些建在公寓大楼上（见图6.30）。

图6.30 建于2011年的日本Kiyomino Saizu的Cosmo镇的社区规模光伏发电设计方案（资料来源：© IEA）

在美国加利福尼亚州，住宅太阳能系统的成本一般为 8～10 美元/W，若减去当地政府的补贴以及通过批量采购获得的折扣，安装成本可低至 3～4 美元/W，即 10～12 美分/kWh。若没有政府补贴，对于极大型光伏发电系统，成本（阳光充裕的天气）介于 22～40 美分/kWh 之间[㊀]。

如前面提及那样，光伏发电的价格正在逐渐降低，欧盟 2008 年光伏市场的报告也认为，“未来，只有光伏和其他可再生能源技术的报价只会降低而不会提高”。[㊁]在过去的 15 年内，光伏发电的价格每年平均下降 4%，光伏电池的光电转换效率的提高和生产规模的扩大是导致其价格下降的主要原因。同时，由于化石能源价格的不断攀升，光伏发电的投资回收期越来越短，其实用性越来越强。

6.3.2 炎热或日照充足的国家

显而易见，在世界上阳光最充裕的区域，光伏发电的效率最高。根据季节变化，对光伏发电组件的方位进行优化调整使得几天甚至几周阳光不间断地照射于其上将会使投资回收最快。处于北纬 35°和南纬 35°之间的所谓阳光地带是最适合发展太阳能的地区，同时这些地区对电能的需求也正在急剧地膨胀，该地区的国家拥有世界 75% 的人口，而且人口增长率也是最高的。

美国加利福尼亚州南部就是这样的地区之一。加利福尼亚州电力局通过计算发现在夏季，空调用电高峰期和太阳能供应量之间有极佳的匹配度，因此电力局支持在夏季安装并网的太阳能光伏发电站，特别是在酷暑期间，阳光毫无遮挡地照射地面，即使在清晨和晚上，天空也非常明亮。他们计算得出，有效装机容量为 5000MW 的光伏电站可减少 3000MW 的电网峰值负荷。

㊀ SolarBuzz, www. solarbuzz. com/ModulePrices. htm, accessed May 2010.

㊁ Arnulf Jäger-Waldau, PV Status Report 2008, Renewable Energy Unit, European Commission, Italy, September 2008.

目前光伏发电仍然仅局限于有政府财政补贴的地区，但在日照充足的地区，预计光伏发电将快速发展并成为有竞争力的能源来源。最近的一个报告预测，“如果这些地区的国家的光伏发电的潜在增长得以完全实现，大规模并网光伏系统的平均化电力成本（LCOE）在2015年应该可以降低40%，而在2020年能降低60%左右”，LCOE是电站使用寿命内所有支出和收益之和，通常用它作为光伏发电系统售价的标准。“若真的是这样，光伏发电将在2015年成为最大的能源来源，而在许多国家，光伏发电甚至可以和一些中小型发电技术相抗衡”㊀。

集中式光伏发电站和分散式光伏发电站的讨论都很多。拍摄于2010年的关于太阳能的德国纪录片《第四次革命：能源自主》（Die 4. Revolution- Energy Autonomy）对光伏发电的未来发展进行了预测。一些机构如国际能源署更偏向于在日照充足地区建造配有光伏发电的集中式发电站，它比现有的发电模式更具可持续性。而另外一些人，如欧洲太阳能协会前主席和世界可再生能源委员会主席赫尔曼·谢尔博士则认为建筑师和规划师需要改变思维方式，他们应该把太阳能发电整合到建筑、街道中。他在纪录片中说：“部分建筑师和顾客缺乏远见，他们没有意识到，把太阳能发电整合到建筑中之后他们将可自主发电，所增加的极少的成本将很快被节省的电费抵消掉。正如现代文明城市不允许将垃圾直接倒在街道上，我们也应该不允许任何地方出现本可以避免的碳排放以避免整个社会都暴露于由之产生的危害中。”维克森林大学纳米科技与分子材料中心主任和新型光纤光伏电池发明者大卫·卡罗尔说过：“如果你不自己使用屋顶，而把它租给电力公司安装光伏发电模组，电力公司根据发电量付给你租金，你愿意这样做吗?”

人口密度较低的地区，如中国的农村地区和非洲大部分地区更

㊀ Potential of On- Grid Photovoltaic Solar Energy in Sunbelt Countries by the Alliance for Rural Electrification, Brussels, December 2009.

适合于建造分散式发电站，因为就地发电可以避免长距离输送电能所带来的低效率和高投入。赫尔曼·谢尔提倡这种光伏应用模式，特别是在发展中国家，他所领导的欧洲太阳能组织的目标就是推广这种模式。部分得益于欧洲太阳能组织的推广，部分得益于日益增长的全球市场，中国内销和出口的光伏组件的生产规模均大幅提高，日本、欧洲和美国的太阳能公司所面临的竞争压力越来越大。

专栏 6.6　韩国的 Asan 绿色村庄（见图 6.31）

图 6.31　位于韩国的 Asan 绿色村庄（资料来源：© IEA-SHC 和S-Energy有限公司）

该房地产项目始建于 2005 年，共有 26 套半独立式住宅，其中每套住宅朝向赤道方向的斜面屋顶上都装有功率为 8kW 的晶体硅太阳能电池板，所有建筑都被设计成朝向南方。每栋建筑有 4 户住家，每个家庭可拥有 2kW 的太阳能电池板，整个系统实行并网发电。该绿色村庄项目是由隶属于人类栖息地环球总公司旗下的人类栖息地韩国分公司设计建造的。

6.3.3　电网同价

光伏发电可与传统发电形式竞争的关键取决于其安装的地理位置以及它是并网发电还是独立发电。电网同价是指用户使用自家光伏发电系统发电的成本比从供电企业购买电力更低。电网同价的时间点取决于当地的地理位置（太阳辐射量）、安装光伏系统的费用以及当地用电的价格，某些地区很快就能实现电网同价，有些地区则可能慢一些。通用电气首席工程师预测，美国日照充裕的地区（包括加利福尼亚州）将于2015年实现电网同价，而据预测德国的时间可能还更快些。严格来说，电网同价不能计入财政补贴，它取决于单位Wp的安装费、当地的太阳辐照量和当地的用电价格。判断的依据非常简单，一旦财政补贴撤销就表明已实现了电网同价。

通用电气公司首席工程师已经做出预测，美国日照充裕的地区包括加利福尼亚州将于2015年左右实现无补贴的电网同价。而在德国，尽管需要缴纳上网电价，电网同价依然可以更快地实现（见图6.32和图6.33）。

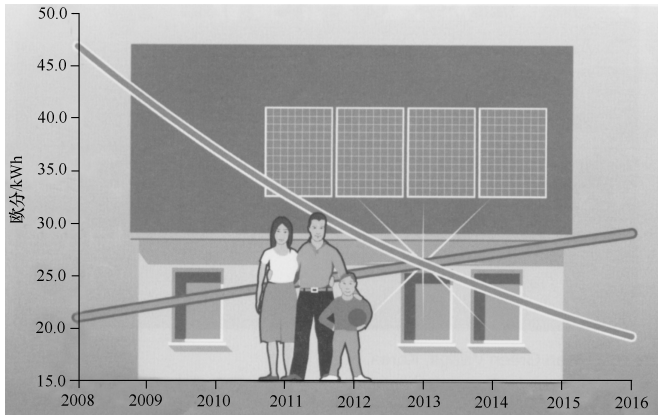


图6.32　德国将在不远的将来实现电网同价政策。当家庭安装太阳能电池发电的成本（如图中递减曲线所示）低于从发电厂中购买的电价（如图中递增曲线所示）时，电网同价的时代就将到来，当然这与人们安装太阳能电池所需的成本、该地区全年度太阳能辐射总量以及该地区的电费有着密不可分的关系（资料来源：BSW-Solar，www.solarwirtschaft.de）

图 6.33　德国勃兰登堡的莱布罗斯太阳能发电站，该发电站由 Juwi 集团和 First Solar 公司建造，该地区曾是一处受污染的废弃军火库。莱布罗斯发电站占地面积约有 210 个足球场大，其发电功率为 53MW，直到 2009 年该发电站仍为世界上第二大太阳能发电站（资料来源：© Juwi 集团和 First Solar 公司）

6.3.4　容量可信度

另外一个衡量能源供给的经济效益和太阳能发电站是否具有较高的成本效益的方法是比较它的容量可信度，它是衡量并网光伏发电场可作为峰值电力的可靠来源的性能指标，有时称为有效负荷承载能力（ELCC），它代表必要时可向电网提供的发电容量。一些以公用电力负荷数据为基础的研究表明在全美范围内各个地区，特别是那些夏季酷热、白天商业用电需求量大而供暖用电需求量小的地区，太阳能发电的容量可信度是很高的。

现在世界上许多大城市都满足日照充裕、用电量大等条件，对于这些地区，除了使用光伏发电，还应认真考虑采用太阳能集热器进行主动式太阳能供冷。正如本书其他地方所提到的，这种方式可以提供热能以驱动吸附式或吸收式制冷机，其效率比使用电能的空调器和制冷机更高，不管其电能是否由光伏发电提供。

加利福尼亚州光伏发电站的年平均有效载荷能力是光伏系统额定功率的 64%，而在盛夏期间甚至可以超过 80%，因此加利福尼亚州电业局认为光伏发电对于满足该州电能储备的需求是很重要

的。与火力发电站相比，由于光伏发电可建设在电网可覆盖到的范围内，因此其电力传输的损耗更小，而大型火力发电站通常建造在离用电负荷终端较远的地方。

必须注意的是，光伏发电成功与否很大程度上取决于电力负荷类型以及用电模式，即用电高峰期必须处于峰值日照时刻，当然，也可以通过使用太阳追踪系统或对屋顶式光伏组件进行混合的朝向来延长光伏电池的峰值发电时间以匹配用电模式。也就是说，朝南的光伏组件的安装角度低一点，朝西南的安装角度高一点。

6.4　光伏电站

在光照充裕的地区，建造大规模太阳能发电站是一种较为经济的选择。这类太阳能发电站通常占据较大的地表面积或工业厂房屋顶面积，同时这类系统通常都带有能够追踪太阳运行轨迹的跟踪模块。

大规模光伏电站在设计阶段，对其预期的发电量进行精确的计算是非常重要的，计算时需要考虑的因素比家用光伏发电系统更多，例如，需要考虑以下基本因素，而且还需要考虑这些基本因素随月份的变化情况：

1）系统所在地区的大气清晰度。

2）系统是否具有追日跟踪模块。

3）系统接收到的散射光与直射光的辐射量。

4）系统所在地区日出与日落的时间。

5）这些因素与光伏系统的相对角度。

除了上述因素外，还要考虑由于太阳光线照射角度的变化，光伏模组表面及模组周围表面对太阳光线的反射产生的能量损失。通过这样的计算，设计者才能知道光伏系统在某一时间段（如在冬季）的发电量是否足够，或者在多云天气条件下需要多大规模的光伏系统才能满足要求。

6.4.1 追日跟踪系统

当太阳能发电站的规模较大时，追日跟踪系统就显得尤为重要，它可提高光伏系统 1/3 的工作效率（见图 6.34）。追日跟踪系统使得太阳能面板能够追寻太阳的运行轨迹，从而使得系统能够接收到更多的太阳直射光，这种跟踪运动可沿三个不同方向进行：

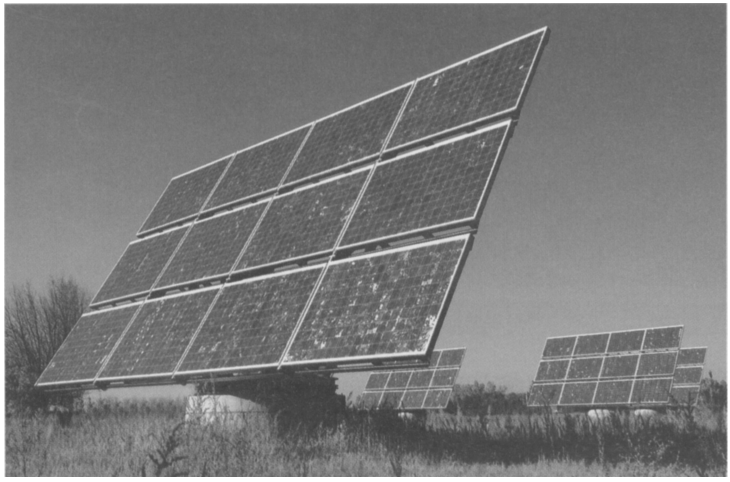


图 6.34 位于德国的一个大型双轴追踪型太阳能光伏系统。这个系统能够自动在东西和上下两个方向追踪太阳的位置（资料来源：BSW-Solar/S. A. G. Solarstrom AG）

1）垂直轴：太阳能面板安装在一个垂直方向的转轴上，这样可以使其与太阳之间保持一个较小的夹角（这意味着转轴在一天内的转动速度是变化的）。

2）倾斜轴：太阳能面板安装在一个倾斜轴上，该轴与地面呈一定夹角并指向南北方向，太阳能面板所在平面沿着南北方向转动。

3）双轴追踪器：双轴追踪器能够使太阳能面板在东西方向上转动，同时还可以改变其与地面的倾斜角，这样可以保证太阳能面板始终正对着太阳。

专栏6.7　实现能源自给自足的德国费尔德海姆地区（见图6.35）

图6.35　德国费尔德海姆，该地区已实现能源自给自足
（资料来源：© Frank Jackson）

居住于德国费尔德海姆的145位居民对他们的能源系统十分满意，该系统将热能、风能、沼气与太阳能相结合帮助居民们实现了真正的能源自给自足。除了从风能上获得的74MW功率（全年约1.7亿kWh电量）以及通过农业废弃物获得的全年400万kWh电能与430万kWh热能外，当地居民还能够通过太阳能电池获得2.25MW的功率，该太阳能电池组由96组阵列组成，安装于一处废弃的军事训练营上。截至2010年，虽然并未对该太阳能电池组的发电量进行精确的计算，但是初步估计其数值约为337.5万kWh。

为了管理这个系统，当地居民组建了属于他们自己的公司——费尔德海姆能源有限公司，由当地居民每人出资3000欧元建立，他们可获得的保证是他们的电费增长速度起码低于国家电费增长速度的15%。事实上，一旦该公司还清了组建该太阳能电池系统时所欠下的300万欧元的债务，那么该地区电费的增长速度将会更低一些，这笔债务预计在12年内还清。像这类的乡镇规模多能源系统特别适合那些拥有较多未与电网相连的住户的农村地区。

6.4.2 现有光伏电站所处的位置

在本书撰写期间，西班牙刚刚建成了世界上最大的太阳能发电站——奥米迪拉光伏发电站，其装机容量高达60MW（见图6.36）。紧随其后的太阳能发电站是位于德国的史特拉斯基星光伏发电站与里博维斯光伏发电站，其发电功率分别为54MW和53MW。世界上目前共有42座运营中并且发电功率高于14MW的太阳能发电站，其中大部分位于西班牙与德国，大多是在最近四年内建成的。除了上述两个国家之外，美国也是光伏发电的先进大国，它在佛罗里达州建有德索托新能源中心，该中心隶属于佛罗里达电力与照明（FPL）公司，2009年10月27日由美国现任总统贝拉克·奥巴马主持启用仪式（见图6.37），其他国家还有韩国和让人多少有点意外的加拿大（加拿大拥有两座总装机容量超过100MW的太阳能发电站）。另外，全球范围内还有超过2GW装机容量的光伏发电站正在规划或建造中。

6.4.3 聚光光伏发电

新一代的光伏发电站已经出现，新系统采用聚光太阳能电池（CPV），其工作效率更高（见图6.38）。CPV含有一系列聚光器来聚焦和聚集太阳光，可以根据聚光器的聚光倍率对CPV进行分类，其数量范围为4～1500倍。聚光倍率越大，光伏电池所需的散热器面积越大，因为高倍率的太阳辐射——最大相当于1500个太阳的辐射量，会产生大量的热量。高倍率聚光的情况下，太阳能电池通常采用多结、多层、高效的电池，以最大限度地吸收不同波长的太阳光谱，聚光太阳能电池的光电转换效率可高达40%。若安装在光照情况良好、天气晴朗、每年正常的太阳光辐射量大于1800kWh/m^2的区域内，聚光光伏发电有可能比传统光伏发电系统更加经济，同时，在相同输出功率条件下，CPV发电站占用的地表面积更小、需要的光伏电池芯片（和硅材料）也更少。

(a)

(b)

图 6.36 位于西班牙奥米迪拉的光伏园区，截至 2009 年，该园区为世界上规模最大的太阳能发电站，占地面积约为 108 公顷（267 英亩），共有 162000 个太阳能面板，在较为晴朗的天气环境下总的发电量为 60MW（即每英亩 224.83kWp 或每英亩 4.45MW）（资料来源：（a）Nobesol Levante；（b）SMA 太阳能技术公司/AG）

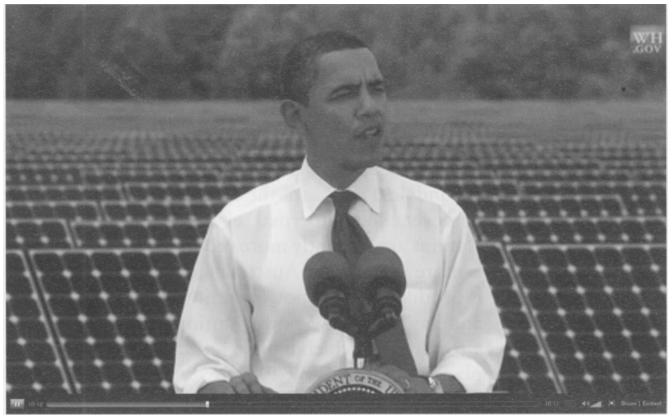


图 6.37　奥巴马总统在美国德索托新能源中心启动仪式上发表演讲。该中心位于美国的佛罗里达州的阿卡迪亚市，建于 2009 年 10 月，是当时全美最大的新能源中心。奥巴马在演讲中也表示了他赞成将“智能电网”作为美国经济复苏的一部分（资料来源：美国白宫网站/公开渠道获得）

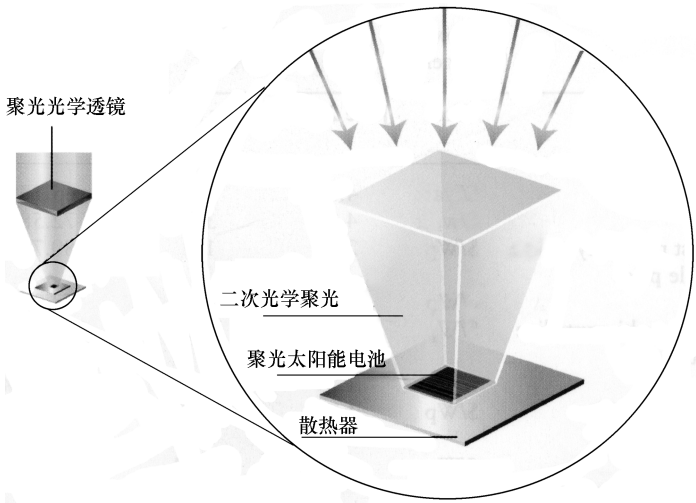


图 6.38　CPV 将光束汇聚到一块较小的太阳能电池上的原理示意图，图中所示的散热器有助于降低电池的温度（资料来源：作者改编自一本关于 CPV 的小册子）

虽然多结电池芯片的价格比传统的硅基芯片高，但是由于它只占 CPV 系统总体安装成本较小的一部分，因此人们还是会考虑选择多结电池。当然，这与太阳能电池模块以及聚光器的聚光倍率有很大的关系，在作者撰写本书期间，中型规模聚光光伏发电系统性价比最高，这种系统通常采用棱镜聚光器，其聚光倍率约为 120 倍（见图 6.39）。但是，以目前的市场市场情况看，通常太阳能热发电站更为经济实用，因为相比之下其技术和工艺更为成熟。生产这种小型太阳能热发电站的澳大利亚太阳能系统（Solar Systems）公司正在计划建造一座装机容量为 154MW 的发电站，该发电站使用太阳能塔来聚集太阳能热，澳大利亚的另外一家公司计划在 2020 年建造 34 座 CPV 式太阳能发电站，每座发电站的最大发电功率为 250MW。

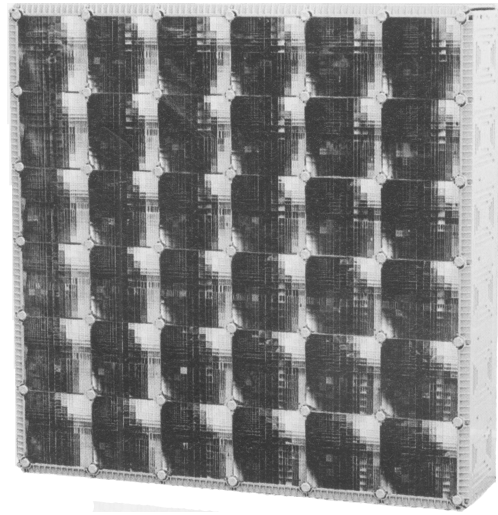


图 6.39　中型的聚光 CPV 模块，该模块通过棱镜将光线汇聚到单结硅太阳能电池板上，聚光倍率为 120 倍，太阳能电池的转换效率为 18%

6.4.4 光伏发电的价格

表6.5所示为本书撰写期间（2010年夏季）各类光伏产品的大致平均价格。

表6.5 各类光伏产品的大致平均价格

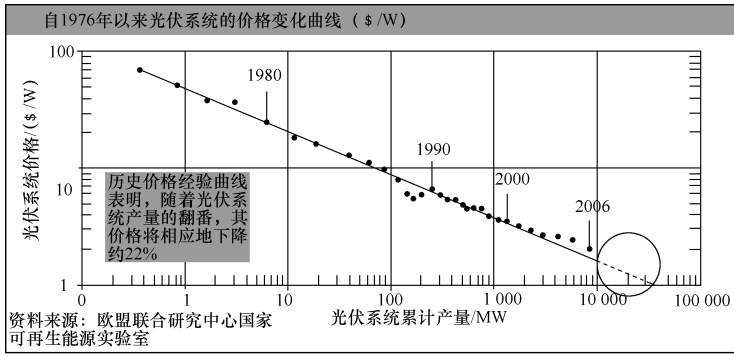
单位峰瓦太阳能模块的价格	单位	2010年6月	2011年5月	在这11个月内的价格降低百分比
欧洲	€/W	4.13	2.69	65.13%
美国	$/W	4.23	3.07	72.58%
单晶模块最低价	$/$W_p$	2.23	1.8	80.72%
	€/W_p	1.65	1.21	73.33%
多晶模块最低价	$/$W_p$	1.74	1.84	105.75%
	€/W_p	1.29	1.23	95.35%
薄膜模块最低价	$/$W_p$	1.76	1.37	77.84%
	€/W_p	1.3	0.92	70.77%

资料来源：solarbuzz.com

6.5 光伏发电的前景

近年来很多国家的光伏行业规模都在急剧扩张（见图6.40）。2008年新增的光伏发电装机容量为5.56GW（比上一年增长了150%）；2009年为7.3GW，而总的装机容量为20.7GW，在2009年新增的光伏电站中，68%位于捷克和德国。而2008年新增的并网光伏发电站超过96%集中于捷克、德国、意大利、美国、韩国和日本这六个国家，而印度则拥有最大的离网光伏发电市场。

根据欧盟委员会联合研究中心能源研究所公布的数据，2008年全球光伏模组产能增长到7.3GW，较2007年增长了80%，而2007年较2006年增长了60%。全球太阳能电池产量2008年为6.85GW，2009年达到了9.34GW，其中18%为薄膜太阳能电池，49%的太阳能电池在中国大陆地区和中国台湾地区生产。预计到2050年，光伏发电将占有全球11%左右的供电份额，每年可减少



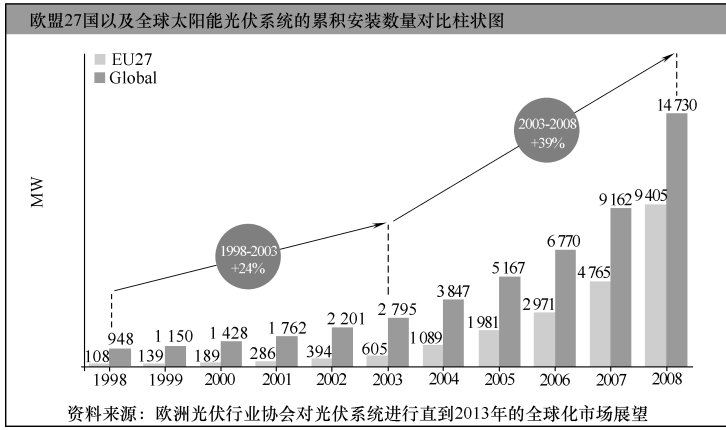


图 6.40 随着太阳能光伏系统安装量的增加，其安装成本在不断地下降，同时根据曲线预测未来太阳能光伏系统将会继续保持较快的发展速度（资料来源：太阳能光伏发电：2020 年欧洲主流用电来源，欧洲光伏产业联盟 2010 年布鲁塞尔会议，2010 年 7 月从 www. setfor2020. eu 网站获得）

2. 3Gt CO_2 的排放量[㊀]。这个增长速度比 1996 年欧洲光伏产能未来

㊀ Trends in the Global Solar Photovoltaics Industry, Aruvian's Research, 2010, and Marketbuzz® 2010 report, San Francisco.

规划的预计要快好几倍，该规划预计2010年新增产能为1000MW、装机容量为2000MW，这一数据在当时已被认为过于乐观了。该规划预计年增长率为35%[一]，以任何标准看，这种增长率都是令人惊叹的，这部分归因于政府的支持，特别是德国。

光伏行业在研究和技术创新方面投资巨大，创造了就业机会，并且大多数为熟练、高质量的工作岗位。欧洲光伏技术论坛预计到2010年光伏行业能为欧盟创造超过20万个工作岗位，而全球范围内将超过200万。中国现在是太阳能电池的最大生产国（中国大陆地区年产量为2.4GW，中国台湾地区年产量为0.8GW）接下来是欧洲的1.9GW，日本的1.2GW。如果这种趋势得以延续，到2012年中国可能会占到全球太阳能电池总产能的32%。

由于光伏产品可靠性高，寿命可超过20年，因此值得国家与企业进行投资。本书撰写期间，90%的光伏电池产品是晶体硅基产品，但是由于合适质量等级硅产品的短缺，光伏产品产量最近已经受到影响，但这可能只是一个短期问题。薄膜太阳能电池的产量一直在增长，如果所有的扩产计划能够实现，预计薄膜电池产量可以在2010年达到11.9GW（占总产量39GW中的30%），2012年可达20.4GW（总产量为54.3GW）。[二]

截至2008年底，欧洲光伏发电的累计装机容量为9.5GW，比2000年时设定的目标值多了3倍多。2008年，美国的累计装机容量约为1.15GW（其中768MW为并网发电），该年内美国新增的光伏发电装机容量为342MW，其中292MW是并网发电的，超过3/4的发电站安装于加利福尼亚州、新泽西州和科罗拉多州，成为世界第三大的市场[三]。中国的目标是在2011年总装机容量达到2GW，

[一] Photovoltaics in 2010, European Photovoltaic Industry Association, Brussels, 1996.

[二] Jäger-Waldau, PV Status Report 2009, note 4.

[三] Solar Energy Industry Association (SEIA), US Solar Industry Year in Review 2008, www.seia.org, accessed May 2010.

中国于2009年6月制定的一项新的能源刺激计划希望光伏发电装机容量于2020年能达到20GW。同样地，光伏行业在印度（已经制定了国家太阳能计划）和韩国也获得快速增长。

尽管如此，2008年光伏的发电量仅占欧洲最终电力耗费量的0.35%，而且大约只有150万户家庭的日常用电是由光伏发电站提供的。从全球范围看，光伏发电量占所有基础能源需求的不到0.01%，国际能源署预测全球电力需求将从2008年的17.3万亿kWh增加到2030年的4.7TWh，增长了78%。因此，即使光伏产业保持目前的发展速度，也只能勉强跟上电能总需求的增长速度，要使光伏产业发挥更重要的作用，就需要坚定的国际政治意志以进一步增加其发展速度。

新应用

目前太阳能电池还无法产生足够的功率来替代燃油驱动汽车或飞机，但是，这并不妨碍人们不断地研究与创新，并将太阳能应用于船舶、汽车，甚至飞机上。采用太阳能的运输业有很好的市场前景，在一些领域尤其在船舶运输方面已经开始应用了。

1. 太阳能船舶

有些船只如游船就可以使用太阳能，因为它不需要很快的行驶速度，载重量也不大（见图6.41）。船只上安装的太阳能电池板给船内的蓄电池充电，蓄电池再驱动电动引擎。太阳能还可以与其他能源（如风能和柴油燃料）组成混合动力系统，也可以仅用来给船上的照明或其他电器供电。

2. 汽车

已举办多届的太阳能汽车陆上速度竞赛，在一定程度上推进了太阳能技术的发展（见图6.42）。最大型比赛名为“World Solar Challenge（世界太阳能挑战赛）”，赛道全长3012km（1877mile），从达尔文到阿德莱德横跨整个澳大利亚内陆。参赛者的最大挑战在于如何使车辆的结构强度最大化、质量最轻化，并提高系统的能效，尤其是电池技术方面。

不过，恐怕我们大多数人都不会希望乘坐比赛中的那些款式车辆出行，因此，汽车生产厂商提供了多种的概念车解决方案，从超

图 6.41　位于德国柏林的一艘太阳能船舶，该船能够搭载 16 名乘客（资料来源：© Frank Jackson）

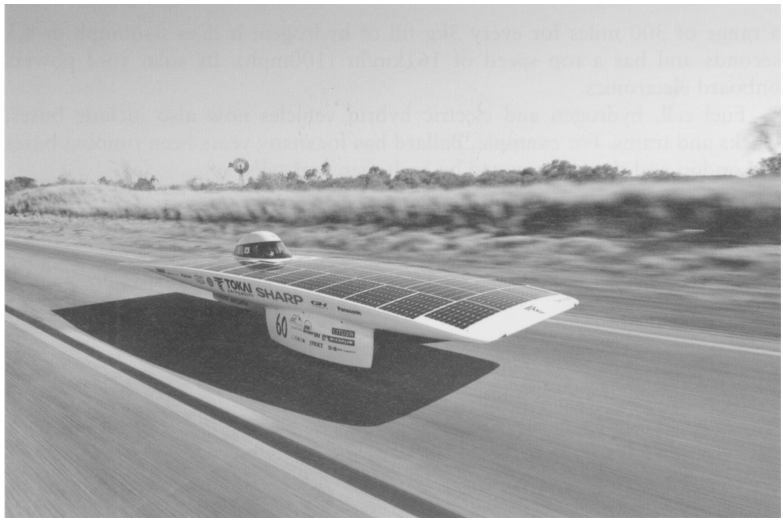


图 6.42　2009 年环球绿色挑战赛的冠军赛车，由日本东海大学太阳能汽车团队研制的“东海挑战者号”（资料来源：维基共享资源）

轻的钳形车，或者更恰当的称为改进型越野车，到混合动力解决方案（见图6.43和图6.44）。在混合动力方案中，汽车内装有电池，夜间可通过电网电力对电池充电，白天则可使用工作场所附近的太阳能电池阵列充电。有些厂家甚至开发出了燃料电池的原型车，这些车行驶时可能需要也可能不需要添加氢气，因为有些车型可通过太阳能电池产生的电力电解水产生氢气。这些车中就包括通用汽车公司的混合动力概念车——雪佛兰沃蓝达（Chevy Volt）和采用氢气燃料电池混合动力引擎的凯迪拉克 Provoq Fuel Cell E-flex，后者每加3kg氢气燃料可以行驶300mile；其0～60mile的加速时间为8.5s，最高时速可达161km/h（100mile/h）。车顶的太阳能电池为全车的电子系统供电。

图6.43 三菱公司设计的i-MiEV系列汽车（即三菱公司所生产的纯电动汽车）通过锂离子电池驱动安装于轮内的电动机，同时三菱公司声称该电池能够直接通过工作场所的太阳能电池板充电。但事实上这在世界上的绝大部分地区是不可行的，这是因为1L汽油含有约11kWh的能量，假设汽车一天行驶200mile，那么就需要几英亩面积的太阳能电池板才能够提供足够的能量。直接通过太阳能发电来驱动汽车起码在可预见的将来是不现实的，因为目前大部分国家和地区太阳能发电仅占电网总发电量的一小部分，电动汽车通常只能用混合能源所发的电力充电（资料来源：三菱公司）

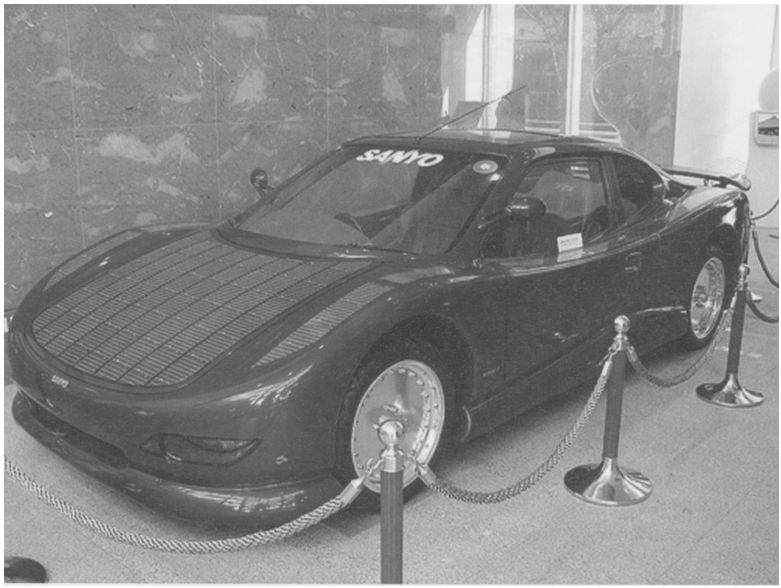


图 6.44　日本三洋电气公司设计的一款概念电动车，其太阳能电池板就安装在汽车表面，但这些太阳能电池只能够为汽车上的电子设备供电（资料来源：三洋电气公司）

有些公交车、卡车以及火车已经开始采用燃料电池、氢气和电力混合引擎。例如，巴拉德（Ballard）公司已经为伦敦和美国的公交车系统提供氢气燃料电池的解决方案。

3. 飞机

光伏电池在航空运输领域的应用近期也取得了很大的进展。一些机型如 Sunseeker 滑翔机等通过使用小型电动机驱动螺旋桨，已经可以在白天飞行了（见图 6.45）。但于 2010 年举办的第一届 26h 无间断太阳能动力飞行大赛要求飞机能够载人并且能在夜间飞行，并计划环游全球（见图 6.46）。换而言之，通过优秀的结构设计，依靠飞机本身太阳能电池所产生的动力能够为电池、飞机本身和飞行员的质量提供有效飞行载荷。Solar Impulse 由安德烈·伯什伯格和波特兰·皮卡德领导的团队设计制造，其翼展与波音 707 型飞机

的一样宽，并采用 11628 块太阳能电池，电池的面积达 200m²（2200ft²），电池为锂离子电池充电，锂电池重达 450kg，容量为 200Wh/kg 或 90kWh，并为 4 台 7.5kW 的引擎提供电力（见图 6.47）。在白天的飞行中，太阳能电池能够收集到足够的能量并储备在锂电池中，为整夜的飞行提供动力。这是一个欧洲项目，由洛桑联邦理工学院（École Polytechnique Fédérale de Lausanne）主持完成。

图 6.45　埃里克·雷蒙德设计的“太阳追寻者”号单人飞机，它曾经成功地从法国飞往西班牙（资料来源：Eric Raymond）

QinetiQ Zephyr 是一架由英国防务公司设计的轻量级（30 ~ 34kg）太阳能飞机。这架飞机由碳纤材料制作而成，翼展 18m，机翼上装满了太阳能电池。采用可充电的锂硫电池，日间充电后可以为夜间飞行提供动力。这架飞机起飞时，需要 5 个人在风中托着它缓跑，直到飞机从他们的手中起飞。

另一架名为 NePhelios 的早期太阳能飞机，被认为是未来商业运输解决方案的先驱者（见图 6.48）。这架 22m 高的氦气飞艇顶部安装有半柔性太阳能电池板，收集到的能量用来驱动安装在吊舱后

图 6.46 “阳光动力”号太阳能飞机于 2010 年 6 月成功地创造了连续飞行 26h 的新纪录（资料来源：© Solor Impulsel Stephane Gros）

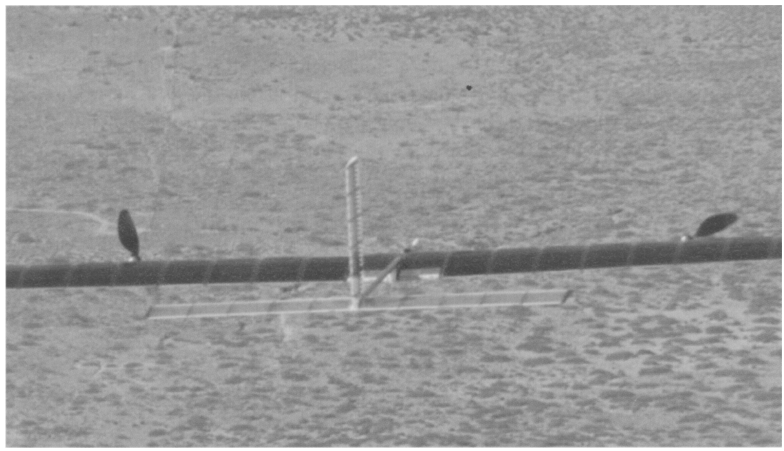


图 6.47 这款无人机能够不间断飞行长达数周甚至数月，目前它已经应用于军事、监测与远程通信等行业。今后太阳能电池在飞行上的主要应用方向很可能会偏向军事与远程通信等行业（资料来源：QinetiQ）

面的电动机，电动机再驱动2个双叶螺旋桨，最高速度可达25mile/h。飞艇的设计者、法国的Sol'R项目组认为，这种设计方案在未来运输行业是很有前景的，尤其是在运送重物或大件货物以及休闲旅游方面。另外，它还具有机动性高、运行安静、零碳排放的优点。

图6.48　这款由法国制造的太阳能动力飞艇称得上太阳能运输与休闲航行行业的先驱（资料来源：Sol'R项目组）

6.6　光伏发电对环境的影响

光伏（PV）模组在发电过程中不会产生污染物或排放温室气体，然而光伏模组及其系统组件在生产、组装和回收过程确实会对环境产生一定的影响。

6.6.1　能源回收期

“能源回收期（Energy payback）”指光伏系统产生的能量等于制造这套光伏系统所消耗的能量相同时的时间周期。经美国能源部

(DoE)[㊀]计算，以目前的技术水平，多晶硅光伏模组的能源回收期为4年，未来预期可缩短到2年。当然，这与光伏模组的安装地区有很大的关系。阳光充沛的地区如北非的能源回收期要比北欧地区的短很多。美国能源部进一步认为，非晶硅光伏组件的能源回收期平均为1~2年，对于安装在房顶并连接到电网的非晶硅光伏系统，加上制作框架和支撑结构所消耗的能量，则需要3年来完成能源回收。对于非并网的系统，其能源回收期会更长一些。

美国能源部根据多恩斯与弗里施克内希特的研究成果认为，光伏系统的制造与石化燃料能源的生产有着相同的能源回收期（包括采矿、运输、精炼和加工的消耗）。假设一套光伏系统的寿命是30年，其制造过程使用石化基能源，那么这套光伏系统产生的87%~97%的能源是无污染的。这些数字是根据2004年或更早期的数据计算得到的，以目前的技术水平看，光伏系统的能源回收期应该会比石化燃料的更短些。

6.6.2 全球气候变暖的影响

与其他半导体行业一样，生产太阳能电池的过程中也会用到许多种具有潜在危险的化学药剂，其中含氟气体包括六氟化硫(SF_6)、三氟化氮(NF_3)，另外还会用到一些能够影响大气气候的原材料和能够消耗臭氧层的含氟化合物，这些物质会严重影响温室气体的平衡。这一技术领域属于朝阳产业，发展很快，工艺和设备的更新换代也很快。例如，薄膜硅产业已开始使用对大气无害的气体替换SF_6和NF_3等材料。就环保方面而言，一些生产商会做得更好一些，尤其是那些有着严格的环保执法制度国家中的企业。

2009年的一项关于光伏产业碳排放影响的调查研究了安装在

㊀ NREL,2004, What is the energy payback for PV? National Renewable Energy Laboratory, Washington, US, www.nrel.gov/docs/fy05osti/37322.pdf, accessed April 2010.

欧洲南部地区房顶、寿命为30年的玻璃/玻璃封装的薄膜非晶硅基模组和纳米结构薄膜硅模组（一种比较罕见类型的模组），结果发现，在非晶形硅光伏系统的使用寿命内其碳排放量为0.03～0.04kg（CO_2）/kWh，微晶硅薄膜为0.06～0.08 kg（CO_2）/kWh，这些数值可以媲美天然气的0.195g（CO_2）/kWh和英国国家电网的0.55g（CO_2）/kWh（全年平均值）[㊀]。

6.6.3 加工和处理过程的污染

光伏太阳能电池板在生产制造过程中会使用到很多有毒的化学物质。硅谷毒物联盟（SVTC）[㊁]发布的报告称：在环境监管体系良好的国家中，也许没必要对这些污染可能造成的影响而担心并发出警告，然而并不是所有地区都有如此严格的监测和控制实施力度。但在太阳能面板达到使用周期后的回收和处理过程所带来的问题上则需要多加以关注，硅谷毒物联盟呼吁将太阳能电池板归类为电气和电子设备废弃物，并对强制性回收和再利用进行立法。

硅谷毒物联盟还编写了“太阳能电池公司调查和记分卡”[㊂]，用于评价太阳能电池产业的公司对其产品的影响所承担责任的履行情况。并非所有的厂家都会对要求披露其生产实际情况的要求进行回应，尽管这样，如果对你购买的光伏电池产品负责任，购买之前咨询一下相关情况还是很有益处的。同样地，生产厂家也面临压力，他们被要求制定回收和处理到期产品的计划，目前除执行

㊀ E. Alsema, and R. van der Meulen, 'Fluoride gas emissions from amorphous and micromorphous silicon solar cell production: Emission estimates and LCA results', Copernicus Institute/Utrecht University, the Netherlands, 2009. Available at: opus. kobv. de/zlb/volltexte/2010/8346/pdf/3889. pdf, accessed October 2010.

㊁ D. Mulvaney et al, 'Towards a just and sustainable solar energy industry', Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC), San Jose, CA, US, 2009.

㊂ www. solarscorecard. com, accessed October 2010.

“报废电子电气设备指令（the Waste Electrical and Electronic Equipment Directive）”的欧洲以外，一些国家在处理报废设备责任问题上的立法往往不够完善。

6.7 新的光伏发电技术

6.7.1 染料敏化太阳能电池

这种类型的太阳能电池是由瑞士洛桑联邦高等理工学院的迈克尔·格拉茨尔和布莱恩·奥里甘于1991年发明的，又称为格拉茨尔电池（Grätzel cells）。这些太阳能电池是由低成本的材料制作而成，不需要复杂的加工设备（见图6.49）。这种电池的结构十分简单，包括两个电极和一种含碘的电解质，一个电极是通过将吸收染料的高度多孔纳米二氧化钛（nc-TiO_2）沉积在透明导电衬底上制备而成，另一个电极是透明的导电衬底。TiO_2是一种十分常见的物质，如在牙膏和防晒乳液中会用到。

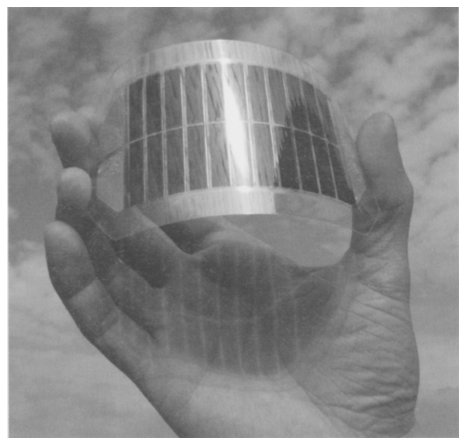


图6.49 染料敏化太阳能电池能够印刷到各种有弹性的透明塑料以及其他多种材料上（ISE，www. exposolar. org/2010/eng/center/contents. asp? idx=88 $ page=1&search=&searchstring= &news_type=C）

染料可以是有机的，来源于植物，例如刺莓（Pokeberries）或黑莓（Blackberries）中采集到的染料。当光线照射到染料敏化太阳能电池上时，会被染料吸收。由光线提供的额外能量使得电子从染料中被激发出来并跃迁到 TiO_2 中，然后从 TiO_2 扩散到电极，最后这些电子通过电解质再次回到染料上。目前这项技术在实验室水平上的光电转换效率约为7%，但是还有很大的提升空间。这些电池生产价格便宜，预计在几年内量产并成为主流产品。

6.7.2 纤维基太阳能电池组件

美国北卡罗来纳州威克·弗里斯特大学的纳米技术和分子材料中心拥有使用染料电池技术制作纤维基太阳能电池的专利。由于纤维的表面积很大，这些太阳能电池能够收集从日出到日落任何角度的光线。塑料纤维可被冲压在塑料板材上，与软饮料罐顶部的黏合技术相似，聚合物或便宜的染料喷涂于塑料纤维表面作为太阳能吸收器。这些塑料模组质量很轻，可弯曲，发明者认为可以把这些材料卷积起来并以很便宜的运费运送到发展中国家去，然后由当地工厂的工人在其表面喷涂染料，这些染料可以从当地收购，如当地的刺莓工厂，最后进行封装就可以进行安装了。

6.7.3 具有加热和制冷能力的层压光伏板

层压光伏板可以将阳光同时转换为电能和热能。目前层压光伏板在建筑一体化方面的应用正在进一步的研究中，它由非晶硅层压光伏板、作为热沉的相变材料、金属顶板组成，通常用于工业或企业建筑中。初期的研究结果很是乐观，它表明由于相变材料具有蓄热能力，在冬季供暖时可以吸收相对较多的太阳能，并能够提高整个阁楼的晚间温度，当然，这些光伏板同时也产生电能。为了减小气温较高如夏季时层压光伏板可能需要的额外冷却负担，热沉的设计要使其夏季时对热量的吸收最小化。热沉可以直接加装在现有的房顶上，这是一种经济有效的改装方法，但是相变温度需要根据当

地的实际条件进行设计。

6.7.4 纳米技术和电池印刷技术

传统薄膜太阳能电池在沉积染料时需要在昂贵的真空设备中进行，能否采用传统的印刷技术将染料印刷在任何材料上？纳米技术的目标就是要实现这一点（见图6.50）。采用这种方式，太阳能电池的发电表面结构能够以更快更经济的方式进行生产。全自动的工厂完全可以印刷、层压、封装这种面板。采用铜铟镓二硒化物（copper indium gallium diselenide）制作的面板结合纳米结构组件制作的光伏电池组件已为这种富有创造力的可印刷半导体技术打下了良好的基础，并且随着需求的增加，价格会逐步下降。

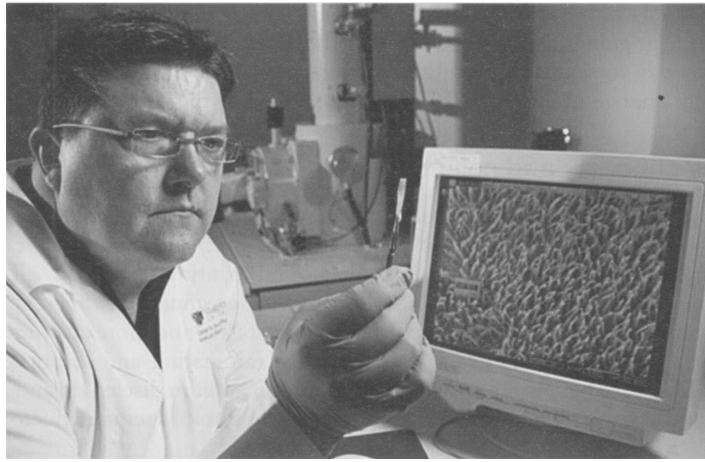


图6.50 大卫·卡罗尔，威克·弗里斯特大学的纳米技术和分子材料中心主任，利用纳米科技发明了新型纤维电池（资料来源：威克·弗里斯特大学的纳米技术和分子材料中心）

参 考 文 献

Martin, C. L. and Goswami, D. Y. (2010) Solar Energy Pocket Reference, International Solar Energy Society, Earthscan, London

第7章

独立光伏发电

7.1 离网光伏系统

赫尔曼·谢尔（Hermann Scheer）认为，如第6章所述，在偏远地区和农村地区利用太阳能发电具有较高的性价比并且改变着当地人的生活。在没有电网供电的区域，利用太阳能作为替代能源或者再辅以柴油发电机就能得到人们梦寐以求的电力（见图7.1）。太阳正被用来改变人们的生活，例如通过水泵得到淡水、昂贵的药品可保存在冰箱中，或者提供夜间照明使得孩子们可以在晚上学习（见图7.2）。独立运行的光伏模块具有上述甚至更多的功能，下面列出部分例子。

图7.1 不受电网停电的影响是光伏发电的优点之一（资料来源：Steca）

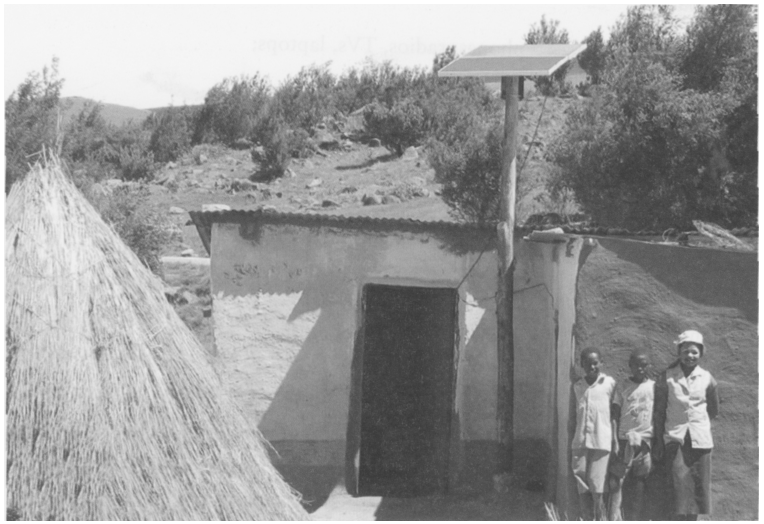


图 7.2　像这样的独立光伏系统可以让偏远地区的孩子在夜晚学习（资料来源：Steca）

全球：

1）便携设备应用——手机、收音机、电视机、笔记本电脑。

2）大篷车、舰船。

3）电信——接收基站、移动电话网络。

4）路灯、街道设备和信号灯。

5）航海浮标、安全灯、警报系统。

6）车载电池涓流充电器。

7）海水淡化。

发展中国家和偏远地区：

1）家用设施。

2）照明。

3）诊所与医院。

4）学校。

5）郊区车间与商业照明。

6）水泵。

7）其他发电机备用电源。

8）微型电网。

9）旅游业（住宿，公园）。

10）双向电台。

11）用于救灾的紧急电力。

我们将会进一步讨论这些应用的细节，但是有关独立光伏系统的规格、详细说明、安装等内容不在本章讨论范围内，该部分内容在本丛书的《独立太阳能发电系统》一书中有详细的介绍。

全球没有单一化的光伏市场，光伏系统应用时需要综合考虑区域市场的特点和特定的应用场合才能提供最经济实惠的解决方案。在发达国家，并网太阳能光伏系统的数量已超过独立光伏系统，例如 2005 年美国并网光伏系统首次超过独立光伏系统。但是在发展中国家，情况正好相反，截至 2008 年底，印度的多数光伏系统是离网式的，主要应用包括太阳能灯、太阳能家用设施、太阳能路灯和水泵系统。只有 33 处是并网发电的，其全部装机容量只有约 2MWp。印度新能源与再生能源部，还有中国政府，已经为增加他们国家的并网光伏发电系统制定目标，并且制定了能源补贴政策和电力购买计划。

不可否认，光伏模块及其附属设备非常的昂贵，但是从长期看，它们在使用寿命期内的费用还是很划算的，与柴油发电机比较，他们不需要不停地购买柴油，设备也不需要送到很远的地方去维修和保养，相反地，光伏组块几乎不需要维护，因为没有运动部件，其寿命可达 15 ~ 20 年。若使用恰当，光伏模块的输出功率是可以预见的。若安装和使用正确并且具有足够的电力存储容量，光伏设备可以很可靠地工作。培训当地的技术人员至关重要。

7.1.1　便携设备

在远离电网供电的偏远地区，具备通过太阳能为蓄电池供电的设备和电子产品在保持电力供应连续性方面是极具价值的。市场上

许多典型的电子产品已经具有太阳能充电的适配器或接口，有些还嵌入太阳能电池板，如收音机、电视机和照明灯。由太阳能供电的照明灯大多数使用 LED 灯，LED 即发光二极管，耗能极低、发光效率很高，并且其光线具有方向性，用输出功率为 30W 的光伏电池模块提供的 22W 功率足够光通量为 240lm 的 LED 灯持续照明 6h（见图 7.3）。一些装有发条的老式收音机和照明灯同时还装有光伏组件。

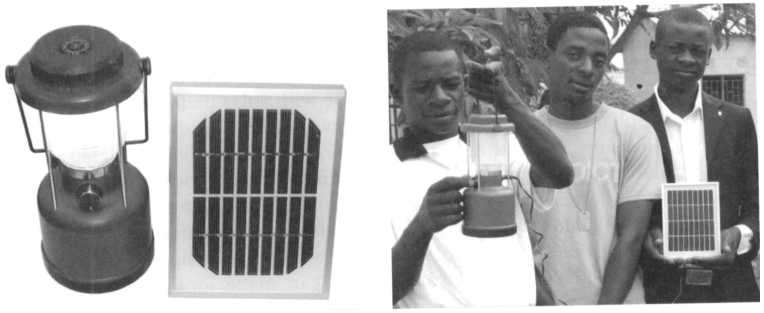


图 7.3　太阳能灯笼由 32 只 LED 灯组成，寿命可达 10000h，相比之下，卤素灯寿命只有 1000h，U 型荧光灯只有 5000h。与之配套使用的光伏模组额定功率为 2.5W，灯笼内置 2.5Ah 的蓄电池（资料来源：© Dulas 有限公司）

至于那些消耗更多功率的产品，如笔记本电脑、电视机、电冰箱等，也可以采用特别定制的光伏模组输出与上述产品匹配的电压和电流。对于徒步旅行者，配备可折叠式光伏组件可以在他们步行的时候对电子设备充电。对于船只、大篷车和游艇，可以选用带有蓄电池的微型风力机和光伏模块混合动力系统。这样，有风或者有阳光的时候都可提供电力。因为没有阳光的时候，风常常很大，反之亦然，所以风能和太阳能可以理想地组合在一起成为混合动力系统。

光伏模块在这方面的应用已经相当成功。通常情况下，光伏模块都会从小系统开始建设，随着预算和负载的增加而逐步增大规模

(负载是电力负载或者任何接入该供电网络的设备的简称)。光伏模组可以通过并网为供电电网增加可利用的供电量，说它简单易用一点也不为过。

通信基站与气象站

因为光伏模组可靠性高、不需要频繁维护，因此常被用来为偏远位置的通信接收基站和其他移动电话网络中继站供电（通信接收站是用于与最近通信基站间进行手机信号的接收、放大和传输的设备)。气象监测站也常用光伏模组供电，毕竟，通过与气象有关的能量为气象监测站供电本身就是一件很有趣的事情。这些设备通常还会以风力机和柴油发电机作为后备供电电源。

例如，位于海地东北方向的希雷亚是个只能使用马匹历经 4h 才能到达的地方，在其海拔为 914.4m（3000ft）的山上有一个电信基站，该基站由一个光伏模组系统供电使其能够全自动运行，冬天光伏模组供电不足时由后备发电机辅助供电。在美国本土，在同样的偏远地区，宾夕法尼亚州泰奥加国家公园最高的山峰之一的雪松山上耸立着一个微波中继站。用电网供电需要敷设 11.3km 长的电缆，由于费用太高而放弃了这种选择，代之以太阳能、风能、发电机混合供电系统供电。在夏天，该中继站完全由太阳能、风能供电而自动运行；在冬天，65% 的供电由发电机提供，另 35% 由太阳能、风能混合系统供电。

由于可靠性要求极高，由光伏模组供电的偏远地区的无线电和通信接收基站或者微波中继站使用燃料电池组件作为后备电源的例子很多。在这种系统中，当太阳能不足以单独为系统的蓄电池充电时，燃料电池自动启动，这种系统通常使用一个无线调制解调器远程监测和控制系统的运行状态。

7.1.2　街道设施

以上所述的优点使得光伏技术广泛运用于街道公用设施中，如灯具（交通指示灯或者公交站台指示灯)、停车计时器或者交通灯(见图 7.4 和图 7.5)。尽管市区有供电网，当地政府利用光伏系统

也是很有意义的，因为它提供成套解决方案并且不需要因为连接电缆而挖开路面。另外，电网断电时，交通系统不会被扰乱，通常情况下安装这种设施时安装商还需要附带有维护承诺。

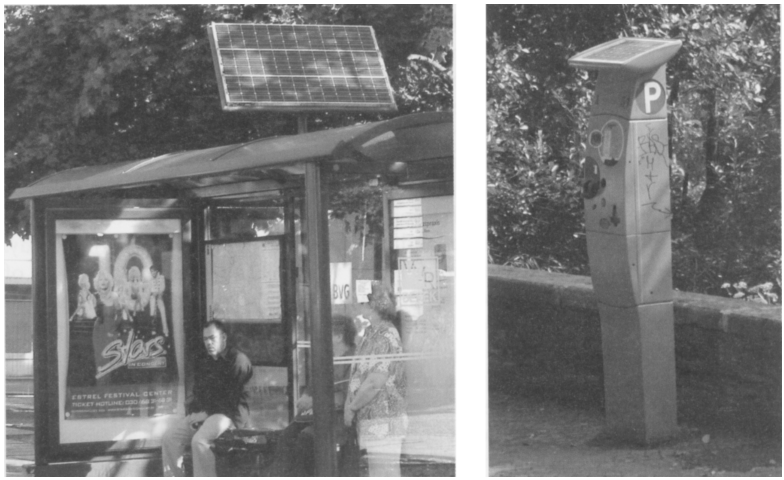


图 7.4　德国柏林的带有光伏电力照明的公交站。意大利罗马的光伏电力停车计时器（资料来源：© Frank Jackson）

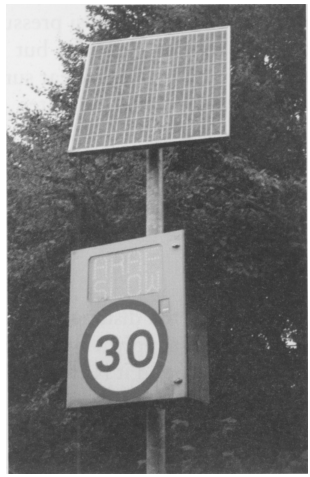


图 7.5　威尔士的一个光伏超速警告系统

7.1.3　供水装置

1. 抽水

在世界上的许多地区没有可靠的饮用水供应，水资源短缺也越来越严重，这将严重影响人们的健康。然而，对于那些由于用水需求量太大或者井太深而无法用人工取水的水井，可以使用光伏组件为水泵供电，从而从深井里抽水出来，这是个理想的解决方案，因为可以很容易地根据水泵的功率选择合适的光伏组件规模，并且由于整个系统中只有水泵本身有机械运动部分，因此系统具有很高的可靠性，即使水泵损坏也很容易修复。若采用其他形式的供电源，例如风力机或者柴油发电机，其维护成本更高。当然，柴油发电机功率更大，抽水量也更大或者可从更深处抽取水，相比之下，光伏模组更适用于光照充足的中小规模应用。虽然机械风力发电也能够很好地运作，但其电力部件在极端环境下容易损坏，例如强风或者灰尘会引起部件迅速老化。当然，在风力资源丰富的区域风力发电可能更便宜。若有需要，光伏发电可以与风力发电或柴油发电混合使用。若水井太深，例如超过 150m，太阳能电力通常不具成本优势。

光伏组件的初期投资较高（可能是柴油发电机的 3 倍），但由于其寿命很长、维护成本很低，它还是值得投资的，并且在使用期间不需要使用燃油，因此比柴油发电机多出来的初期投资成本将会很快得到回收。光伏组件非常适合于人口为 2000 人左右的村庄抽取饮用水，抽取的水也可以用于动物饮水和农作物灌溉（在水源垂直高度差较小的情况下，取决于用水需求量，最大灌溉规模可达 3 公顷或 7.5 英亩）。

在有太阳光的时候水被抽运到位置较高的蓄水箱中以便在没有电力的情况下使用，因此系统非常简单：水泵可由直流电压供电，不需要逆变器；水箱必须足够大以便储存足够多的水供夜晚或阴天时使用。水箱中的水能够在重力作用下流到水龙头或者牲畜饮水口或农作物灌溉出水口，如果水箱安装在至少比房子高出 30m 的位

置时，出水口的水压将达到能满足要求的 20lbf/in²㊀。光伏模块的唯一维护要求就是定期的清洗，但是必须安装在安全的地方。在世界上较热的地区，在天空晴朗的条件下，一个 1kWp 光伏阵列在不同高度下每天可抽取的水量为

体积	高度
$50m^3$	10m
$15m^3$	30m
$10m^3$	50m

光伏组件功率增大，抽水量或者高度将线性增大，例如，一个 2kWp 的光伏可以抽取供应将近 1400 人的用水。然而，这只是一个粗略的估算值，具体所需的光伏组件大小必须根据当地的环境选择。

水泵有多种对应不同的应用场合的类型，如潜水泵或地面泵（见图 7.6）。在太阳能水泵系统中，组件之间的匹配是相当重要的，例如，需要根据抽水量和抽取深度来正确选取水泵的类型和功率。通常情况下，如果知道当地的日晒指数、水泵类型、日均需水量和高度（垂直高度）等参数，一般是成套购买太阳能水泵系统的（见图 7.7）。

2. 海水淡化与蒸馏

光伏系统也以另一种方式即通过海水淡化提供饮用水。在这种应用中光伏系统同样驱动一个水泵，不同的是这里水泵是推动水经过反渗透（RO）膜。反渗透是一个压力驱动过程，通过一个半透水的薄膜从盐水中不断地提取出淡水。同样地，光伏技术可用来代替柴油或风力发电机驱动水泵，并且适用于小型海水淡化系统（见图 7.8）。

在典型的海水淡化系统中，配备或者不配备蓄电池的光伏电源阵列驱动直流水泵，水泵把淡化后的淡水抽送到蓄水池里，这种系

㊀ $1lbf/in^2 = 6.89476kPa$。——编辑注

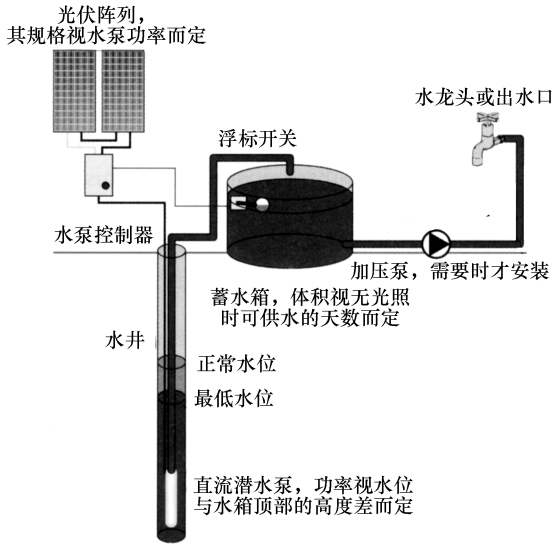


图 7.6　带有潜水泵的简单太阳能抽水系统的示意图

统含有一个初级过滤筒和一个螺旋缠绕的反渗透膜。在阳光充沛地区，15W 光伏发电功率每天可以得到 0.1m^3 的淡水，可以满足多个家庭的饮用和烹饪用水需求。

一些公司可提供海水淡化和污水净化的定制解决方案。它们通常都是小规模应用系统，光伏模组的功率通常为 50 ~ 100W 并带有蓄电池。一个应用系统含有整套设备，包括一个太阳能模组、一个水净化器或水淡化器（它们是不同的产品）。水净化器含有水前级过滤器、紫外消毒灯和一个容量例如为 100L（22gal）的储水箱。这样一套系统通常只有 40 ~ 50kg，易于携带。净化单元可以有效消灭病毒、细菌、原生动物、虫卵等。而水淡化器则用于去除溶解在水中的盐分。在晴朗的热带地区，一个 75Wp 的光伏模组可以提供大概 2000L（440gal）的水，这足够满足 300 ~ 400 人用水需求。

更精密的水净化系统使用交流供电的水泵和利用紫外线消毒水，这样系统的可靠性更高，由于需要逆变器把光伏模组的直流输

出电压转换为交流电压，在净化相同水量的条件下，要求光伏模组的功率更大。由于淡水供应的重要性，系统可以使用蓄电池以提高可靠性。印度特罗贝就有这样的系统，在该热带地区，2kWp的光伏模组每天可提供2m³（20ft³）的纯净水；在亚热带地区，每天只能提供0.8m³（28ft³）水，很明显这不具备成本优势。在任何地区，淡水资源的可利用性及其价格、政府补贴额或相关的燃料价格都会对当地的经济活力有深远的影响力。

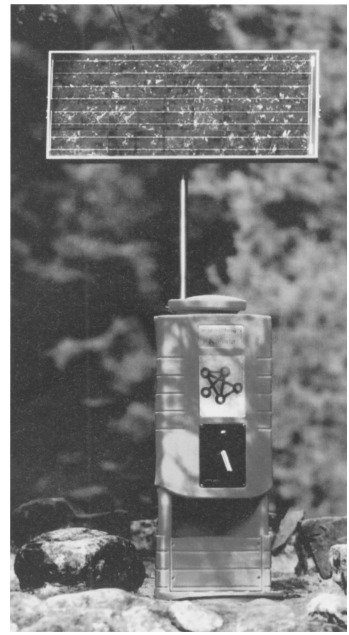


图7.7　荷兰Nedap公司的一体化太阳能水净化器（资料来源：©Nedap NV）

另外，从2006年开始，位于印度桑珀尔盐湖畔的拉贾斯坦邦已经有了社区规模的水淡化设备。这套设备的光伏模组功率为3kW，每天工作6h，可提供5000L（1100gal）的淡水，水源来自于无法饮用的盐水湖，附近的100个村庄的村民通过盐水蒸发生产盐。而这套设备则可以同时生产淡水和盐。

第二种水淡化办法是使用膜蒸馏（MD）技术。膜蒸馏（MD）和反渗透（RO）有两个不同点。第一个是所使用的薄膜的小孔直径不同。对于反渗透，其小孔直径在0.1～3.5nm之间，而膜蒸馏的直径为0.1～0.4μm。由于RO的小孔非常小，只要达到较小的压力，表面张力就会阻止水进入小孔，但是水蒸气却可以通过这些薄膜，在薄膜的另一端，纯净的水蒸气被冷凝成水滴并被收集起来。

另一个不同点是，对于MD技术，在水被光伏供电的水泵导入

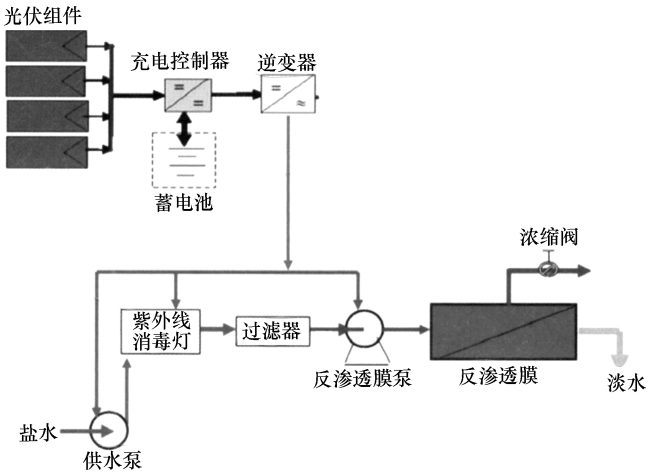


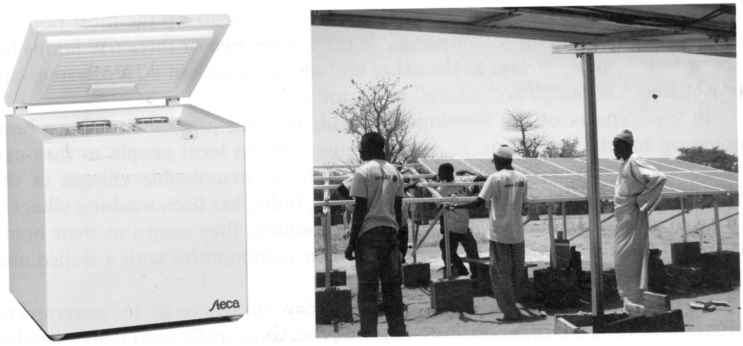
图 7.8　交流电海水淡化系统的示意图

蒸馏薄膜前，系统还带有一个前置太阳能集热器将水温加热到80～85℃（176～185 ℉）。这套系统的处理过程简单描述如下：盐水或被污染的水被抽取到薄膜模块的内置压缩器中，在这里面水被预加热而后进入位于底端的太阳能集热器。水被太阳能集热器加热，水温上升，然后被抽取到薄膜模块的蒸馏器中。蒸馏器中的水蒸发，热量传递给新进入的水，蒸发冷凝后的净水被收集起来而剩余部分回到盐水池中继续下一净化循环。一个 6.7m^2（72ft^2）的太阳能集热器和小型光伏模组每天大约可提供 150L（33gal）的纯净水。

7.1.4　制冷

在偏远地区的农村健康中心的冰箱可用于储存血浆和疫苗（见图 7.9）。由光伏模组和蓄电池供电的这类冰箱为完全不同的国家如也门、印度尼西亚、加纳、尼加拉瓜等提供了可靠的服务。还有更大型的即接即用制冷系统，这种系统适用于援助机构和紧急救援，它含有电力需求与光伏系统完美匹配的冰箱。这类系统常常还包含一套免维护、密封、高效的蓄电池（无危险），一个驱动交流

用电设备的逆变器和一个带有显示屏的充电控制器。



(a) (b)

图 7.9 （a）Steca 公司生产的低能耗 12/24V 直流供电的冰箱/制冷机可由离网太阳能电池供电，其超低能耗（A + + +）意味着在世界上绝大多数地区，它可由单个 75Wp 光伏模组供电；（b）SOLAR23 公司及当地合作者在塞内加尔农村安装的小型太阳能电网（资料来源：（a）Steca；（b）SOLAR23 GmbH，www. solar23. com）

7.1.5 家用系统

在许多农村地区，家用太阳能系统为一些小型荧光灯和其他小型设备提供电力。例如，根据国际能源组织在斯里兰卡的调查，该国大多数家用太阳能系统为 50W 的光伏模组和蓄电池系统，用于驱动几盏紧凑型荧光灯[⊖]。

7.2 基本的系统设计

一个典型的离网或者独立光伏系统将包含以下组件（见图 7.10 和图 7.11）：

⊖ 国际能源组织，世界银行/斯里兰卡能源服务传输计划，影响评估与课程学习，华盛顿特区，2003。

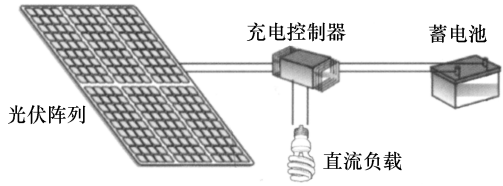


图 7.10　一个基本的家庭光伏系统电路包含一个充电控制器、蓄电池、照明灯或收音机等直流电负载

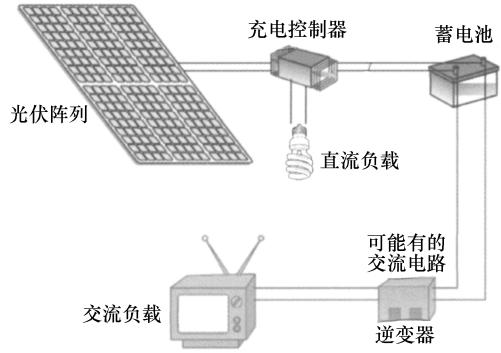


图 7.11　驱动交流设备的系统需要一个逆变器

1）一个光伏模组或阵列。

2）一个电池充电控制器。

3）蓄电池。

4）安全断路器和熔断器。

5）线缆。

6）需要将直流电转换成交流电时（较大型系统才需要）还需要一个逆变器或电源控制单元。

7）负载，如 6 ~ 11W 的直流荧光灯。

光伏模组的装机容量介于 20 ~ 80Wp 之间，常见的为 50Wp。一个 20Wp 的光伏模组每天为 2 ~ 3 个 6W 照明灯供电 4h，而更大型的 80Wp 光伏模组则可以驱动 4 个 8W 的灯泡和一台小型电视机。

在许多发展中国家，用于培训当地居民能独立安装这些光伏系统的项目已经持续了 10 或 20 年的时间（见图 7.12）。例如，位于喜马拉雅山脉一个难以到达的山区，印度拉贾斯坦邦“赤足大学”的村民们正接受着“赤足太阳能工程师”培训。经过训练，他们回到自己的村庄安装太阳能组件，并且为他们社区提供娴熟和完备的维修和维护服务。

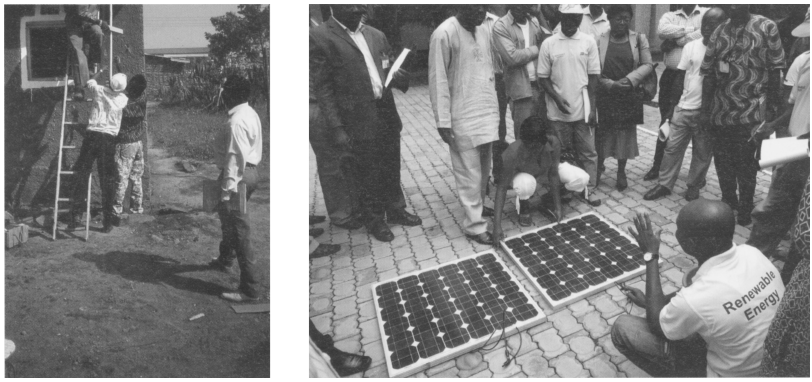


图 7.12　在坦桑尼亚（左）和尼日利亚阿布贾地区（右）举行的太阳能技术培训（资料来源：© Frank Jackson）

这种光伏系统能够得到广泛的应用得益于政府项目和救援机构。2006 年，印度 Aryavart Gramin 银行在其五个分支机构安装了光伏模块为备用蓄电池充电，这样在主电网断电时能输出交流电。随后，这家银行意识到这套系统非常适用于许多生活在没有电力供应的农村地区的客户。因此，银行发起了一项计划，为当地村落的经销商提供商业贷款以帮助他们大量采购太阳能家用系统。这种系统可以为照明、手机充电器、直流电风扇或者电视机供电。

在许多地方，现在供应商可根据特定的要求提供完整的系统，他们会根据计算选择最优化合适的部件。购买之前需要获得不同经销商的报价并且确认他们已具备相应的认证和培训资质以及安装和维护经验。经销商必须了解安装点的纬度和朝向，最好还能提供该安装点的年日照量，或者至少他们有渠道能获得这些数据。

适用于一个地方或一种用途的系统元件在另一个地点或用途中可能不是最优化的，所以需要验证供应商提供的只是通用型解决方案，经销商必须能够解释他们推荐的理由并能提供相关的技术文档。一个有信誉的经销商将会提供产品的保修单和服务合同，另外，正确的安装和恰当的培训是非常重要的。

7.2.1　评估选址

并不是所有地点都适合应用太阳能。光伏模组必须面对赤道（北半球朝南，南半球朝北）安装，安装点理想情况下要求全年都能全天候地接收到太阳光，它不能被山峰、建筑、树丛等遮挡到，特别是阳光最强烈的早上 10 点到下午 3 点时间段。安装点要有足够的空间安装所需数量的光伏模组以保证光伏模组不会受到损坏或者温度过高，模组工作温度越高，其光电转换效率下降越明显。模组的基座和支撑物必须能够承受模组本身的质量、风力加上冬天可能落在模组上面的积雪的总质量之和。

7.2.2　减少用电需求

设计系统的第一步是计算所需的光伏模组的功率，在这过程中应尽可能地减小负荷的用电量，因为比起购买和安装输出功率更大的光伏组件，购买高能效电器如冰箱、灯泡、计算机和监视器等将更合算。小型光伏系统不适用于房间供暖或加热水，或者空调、电磁炉、干衣机等这些高耗能电器。如果需要抽水用于冲洗厕所和洗澡，那么必须安装储水箱、水龙头、喷头和小孔径水管以减少水泵所做的功。

7.3　蓄电池

蓄电池是离网光伏系统重要的组成部分，它可确保在没有阳光的情况下，系统能稳定地工作，因而选择优良的蓄电池是很重要的。电池护理从某种意义上来说是一项艺术，它需要使用者经历一

个艰难的学习过程，若没有维护好蓄电池，将导致整个系统效率降低。在系统的使用期内，因为电池需要经常更换，它们可能是最昂贵的部件。有些电池是全密封免维护型的，但它们都需要定期进行彻底的充放电。

光伏系统的蓄电池通常是铅酸蓄电池，它们又分为“深放电型”和“浅放电型”两种类型。最好选择前一种，因为其储存的电量几乎可以无损害地完全释放出来。汽车蓄电池属于浅放电型的，所以应尽量避免选用。然而，铅酸蓄电池非常笨重。其他种类的电池，如镍氢、镍钙、锂离子蓄电池，由于其轻便且更容易维护等优点有时也应用于光伏系统中，但是权衡之下，其价格还是难以接受。燃料电池常常应用于高性能光伏系统中。

一个给定光伏系统要根据其容量选择蓄电池组，即给定用电量条件下所需的最大存储时间，它通常指无法为蓄电池充电的阴天的天数。蓄电池容量的单位为安·时（Ah），即蓄电池放电完全放电前所输出的能量值，例如，100Ah 容量蓄电池能以 1A 电流连续放电 100h，以 2A 电流放电 50h，并以此类推（然而，由于 Ah 容量与放电速率有关，实际放电时间通常会更短些）。蓄电池所需的输出电流取决于放电期内负载的大小。一旦计算出容量，便可根据这些数值购买电池组。例如，如果需要以 506Wh 功率使用 3 天，把功率数除以蓄电池电压（通常是 12V）再乘以 3 天：$506/12 \times 3 = 42 \times 3 = 126$（Ah）。

电池的容量用 Ah 数表示，为了存储 126Ah 电量，必须购买 3 个容量为 56Ah 的深放电型蓄电池，蓄电池的容量必须留有余地，因为蓄电池不允许完全放电，购买时应该采纳专家的意见。

因为不是所有蓄电池都一样，系统供应商常会推荐那些能与他们模块更匹配的特定型号的蓄电池。铅酸电池在放电时会释放出有爆炸性的氢气，所以必须把它们放置于通风条件良好的空间并且远离其他电力装置和生活区域。使用时应遵循制造商的维护说明，蓄电池损坏后应进行回收以免污染环境。

7.3.1　充电控制器

充电控制器内含一个低压断路器以避免将导致电池永久性损害的过充电。低压断路器通过调节充电电流使得电池完全充电但又不会过充电，这样可延长电池使用寿命。断路器监测蓄电池的充电状态，当检测到电池已充满电时，便自动切断来自光伏板的电压。一些充电控制器还带有最大功率点跟踪（MPPT），它可优化光伏组件输出，增加其输出功率。同样地，需要根据光伏系统的规模和工作电压选择与之匹配的控制器。

7.3.2　维护

需要定期检查与清洗光伏模组，同时还要监测和记录光伏模组的输出功率，这样可以了解系统的运行情况以及找出可能出现的故障点。应该保持蓄电池的电解液处于装满状态，另外，系统应该能够实时显示某一时刻蓄电池中的电量，如果无法自动显示，可以通过计量表和比重计测量。定期检查光伏阵列的电压、模组与蓄电池的温度、逆变器工作状态也是很有必要的。

7.4　交流系统

除了上述的元件，交流系统需要一个逆变器将直流电（DC）转换成交流电（AC）从而为标准的电网供电设备供电（见图 7.13 和图 7.14）。逆变器安装在蓄电池与交流负载之间，并且需要选择“独立式”逆变器（与用于把光伏模组输出电能输送到电网的逆变器不同）。逆变器根据其可承受的电压和电流值其输出的频率和输出功率分类，因此应该选择能够满足峰值负载功率的逆变器；家用量级逆变器的输出功率范围为 100W ~ 10kW。逆变器的输出电压（波形）的质量也随其价格变化而变化：精密仪器需要波形更平滑的电压驱动，也就是和电网一样的正弦波交流电，而像照明、电视、电动工具等设备可以使用方波交流电驱动，方波电压输出比正弦波电压输出的逆变器价格更便宜。

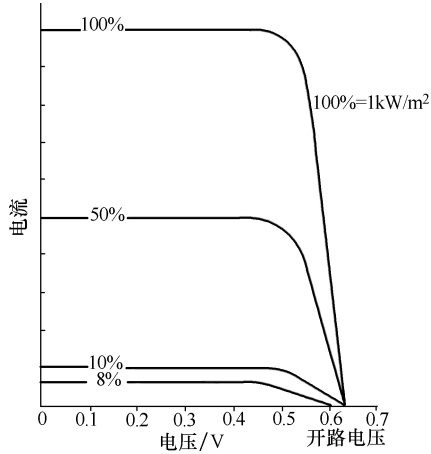


图 7.13　不同光照强度下多晶硅太阳能电池的输出电压和输出电流。由图可以看出，电压受光照强度的影响相对电流更小些，因此即使在阴天也能给蓄电池充电（资料来源：RS 元件公司）

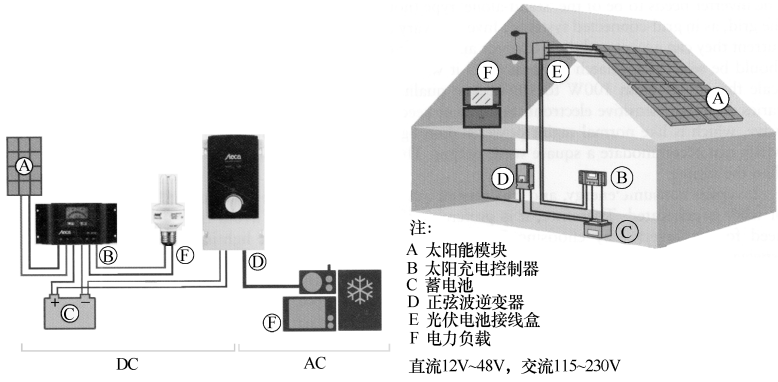


图 7.14　这种光伏系统含有直流电和交流电负载，因此需要逆变器（资料来源：Steca）

逆变器需要消耗能量，并且其消耗的能量可能占光伏模组发电量很大的一部分。因此，如果有可能，尽量选择直流供电的电器和

照明灯以避免使用逆变器，特别是对于光伏模组规模较小的情况。逆变器的转换效率等于输出功率与输入功率的比值，它会随着工作条件如负载量、功率因数、输入电压等的变化而变化。需要使用逆变器时，在系统设计过程中，计算所需的光伏模组规模时必须考虑逆变器的最大功率损耗。逆变器应安装于阴凉、通风良好、干燥的位置。

7.5　混合系统

随着负载功率的增加，在光伏供电系统中加入其他类型的发电机是很有意义的。典型混合系统配置通常包含一种或多种可再生能源（光伏、风力等）、蓄电池、后备柴油发电机。混合系统利用所有已连接的能源对同一个蓄电池组充电，而每种能源需要独立配备充电控制器，负载通常由蓄电池组驱动。

光伏/柴油混合系统是常见的组合方式，虽然这样会产生较高的燃油费用。为一个小村庄提供电力的小型局域电网的负载通常包括社区中心、学校和工厂车间，该局域电网附加的后备柴油发电机能够满足用电高峰期和没有阳光时的供电需求。光伏模组和蓄电池规格更小而柴油发电机功率更大时可以节省系统的成本，相反地，光伏模组和蓄电池规格更大时可减少柴油的使用量。例如，在中国西藏改则县，一个 20kW 光伏模组和 75kW 柴油发电机组成的混合机组可满足 1000 人口的小村庄每日 75kWh 的用电需求。若有需要，这种系统还可以加入一两个风力机。

当更多的负载加入到系统中、要求负载提供更大的电力供应时，应如何配置需要增加的动力系统才最具成本效益呢？进行这方面计算时，很重要的一点是要比较整个系统在使用期内的成本（又称为分级成本）。尽管增加光伏系统的初期投资额比增加柴油机组更大，但在大概 5 ~ 10 年后累计成本就会变得更加便宜。现在有软件如 HOMER 软件（详见第 10 章）可以计算这方面的成本，该软件能够将当地柴油价格与蓄电池价格、光照数据等变量纳入计

算范围（见图 7.15）。计算之后软件给出成本曲线，由曲线就可以看出不同配置选择在什么情况更为切实可行。HOMER 软件在农村电气化工程的规划和初期决策阶段是非常有用的，更多的信息请参阅第 10 章内容。

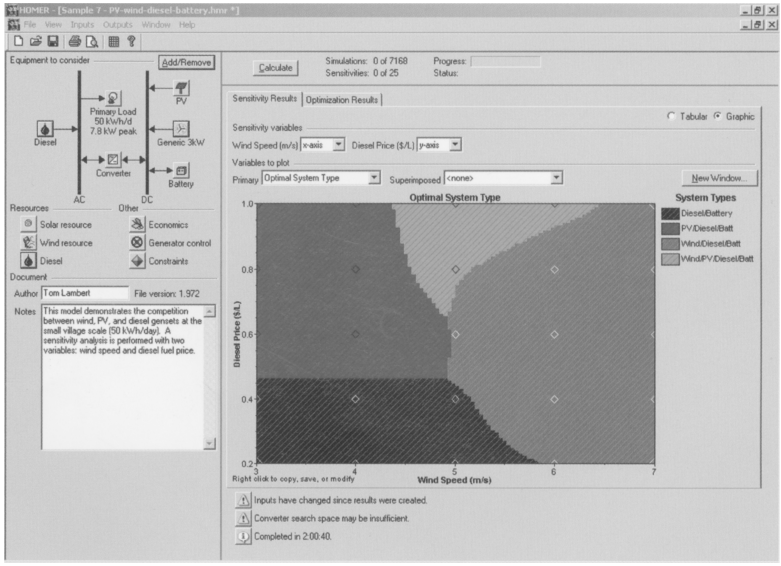


图 7.15　HOMER 软件的界面截图（资料来源：HOMER）

7.6　小型电网

中等规模离网系统可以设计成小型电网为村庄或多个车间、其他建筑供电。通常情况下，这种规模系统常含有光伏阵列、风力机或其他发电设备，控制器、熔断器、电表、电池组和逆变器将被安装在专用的机箱内，然后通过电缆将把电力分配给各个建筑。这种复杂的系统需要安装仔细、负载匹配、系统监测和控制，另外为每种发电设备配备专用的逆变器可以提高系统的效率。

例如，位于威尔士中部的可替代能源技术中心（北纬 52.6°）把光伏组件、水力发电机组以及风力机等不同类型发电设备整合为

一套混合动力系统。刚开始时它是一个离网发电系统，但 15 年前并入了电网。在安装水力发电机的小房子的屋顶上安装了光伏模组，其装机量为 1.68kWp。从安装完成之后的 4 年内，这套系统被持续监测着。在此期间，系统平均每年输出电力 1170kWh，即 696kWh/kWp/年。除了当地阴雨天天数较多外，还有两个原因导致该系统性能稍微不太理想：原因之一在于屋顶朝东南方向而不是朝正南方向，另外安装点的西南角有山脉，冬季时山脉会遮挡相当一部分的太阳直射光。

7.7　未来展望

毫无疑问，下一个世纪光伏技术将改变我们使用能源的方式并为我们认为很重要的设备供电。但把太阳能转换为电能并不仅仅只有光伏技术，还有其他的能量转换技术，包括一个已经使用多年的技术，即太阳能热发电技术，该技术正迅速地显示出其巨大的潜能，我们将在下一章中详细介绍它。

第8章

聚光太阳能热发电

聚光太阳能热发电（Concentrating Solar Power，CSP）系统与PV的工作原理完全不同：PV把太阳的光能直接转换为电能；而CSP则利用太阳的热能产生机械能，再把机械能转换为其他能量，如现在常用于产生电能。CSP技术已出现很长时间，最早可追溯到19世纪，如图8.1所示。把热能转换成有用能量的方法有很多种，

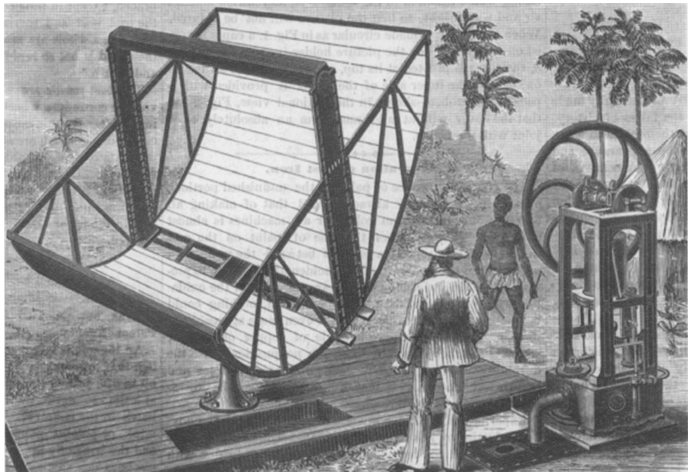


图8.1　1883年，约翰·埃里克森设计的世界上第一台抛物线槽式聚光器和第一台实用级太阳能装置，它利用镀银的曲面窗口玻璃（称为“定日镜”）把太阳光聚焦到3m（11ft）长、安装于曲面焦点位置的铁管太阳能集热装置产生蒸汽驱动斯特林热气机。定日镜宽5m（16ft）、高3m（11ft），沿着西北轴线追踪太阳，最大输出功率2.24kW，每分钟可抽水2273L（500gal）（资料来源：© Creative Commons）

包括使用聚焦透镜、各种形状的反射镜、阳光追踪方法及其装置等，但其工作原理都是相同的，就像小孩子用透镜聚焦阳光在纸张上烧出一个个小孔，CSP 聚焦或聚集太阳光的红外辐射，使温度达到 200 ~ 1100℃ （392 ~ 2012℉），结合传统蒸汽机或涡轮机的工艺，产生的高温通常用于气化液体产生蒸汽驱动汽轮机，从而达到发电的目的。

大规模应用时 CSP 系统比 PV 更具优势：它可与热能储存装置如熔盐燃料电池结合使用，这样即使没有阳光照射也可提供能源。它也可与传统的石化或生物燃料发电机组结合使用以保证发电的装机容量和稳定性。但是，由于其机械运动部件比 PV 电池板的更多，维护成本更高。它们适用于峰值负载和基底负载供电，产生的电能通常并入电网。这种成熟的技术因其可作为解决全球能源危机的行之有效的大规模解决方案而在最近引起人们极大的兴趣，许多大发电厂计划或已经开始在阳光充足的地区建造 CSP 系统。

8.1　发展历史

1913 年，受到约翰·埃里克森（John Ericsson）开创性研究的启发，美国工程师兼发明家弗兰克·舒曼（Frank Shuman）在埃及开罗附近的迈哈迪（Maadi）建造了第一座大规模太阳能热发电站，其太阳能收集器的面积为 1240m^2，产生的电能驱动一台抽水机，用于从尼罗河抽取河水灌溉地势较高的农田（见图 8.2）。该发电站由 5 排抛物柱面槽式反射镜组成，总输出电能为 88kW。这种发电站比相同规模的煤基发电站更具成本效益，预期 4 年内即可收回投资成本，尽管该发电站成功建造，但由于受到第一次世界大战的影响，它只使用了一年。

第一次世界大战开启了石油成为世界最主要能源的时代，战争的主要原因在于日渐式微的英国和当时的新兴经济体德国之间对中东石油资源的争夺。战后，英国军队占领了新同盟保护国伊拉克境内美索不达米亚的所有油田，这也暂时中止了发展大规模太阳能应

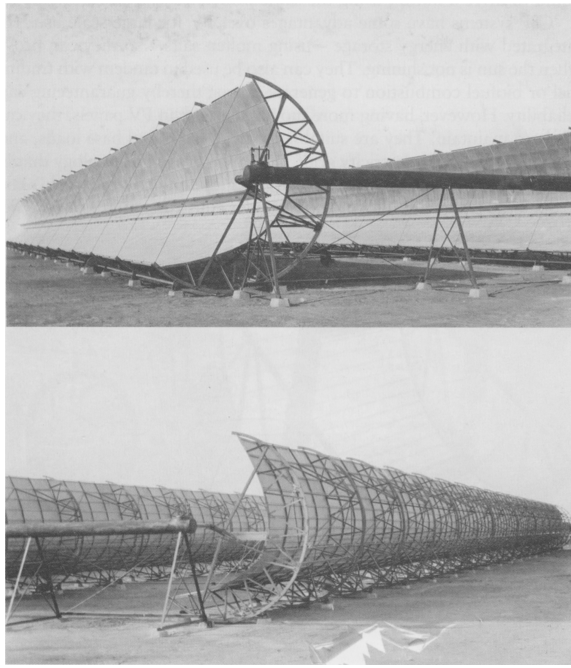


图 8.2　建造于 1913 年、位于埃及的世界上第一座太阳能热发电厂

用的任何尝试和努力。石油的关键性作用使其左右了 20 世纪的发展历史并一直成为国际事务中的一个重要因素。它不仅是经济发展和能源消费技术的基石，也经常是地缘政治紧张和武力争斗的起因。从这一点上讲，由英国出资、埃及劳工建造的位于迈哈迪的发电厂不仅与最近的两次伊拉克战争有关联性，到现在为止仍然对地缘政治有直接的影响力。

舒曼的太阳能热发电厂并不是人类首次使用聚光式太阳能的装置。我们查阅资料发现早在 19 世纪奥古斯汀·穆肖（Augustin Mouchot）和亚伯·皮弗尔（Abel Pifre）就有太阳能印刷机的相关介绍（见图 8.3）。作为学校教师，穆肖建造太阳能印刷机的部分动机在于他预见到总有一天煤炭会消耗殆尽，另外，太阳能是免费且容易获得的。但实际上远在公元前 672 年，中国人已开始使用曲

面镜点火；公元前 4 世纪，欧几里德（Euclid）进行过类似的研究；公元前 133 年，亚历山大的希罗（Hero of Alexandria）研究了光在平面镜、凸透镜和凹透镜上的反射现象；在利奥纳多·达·芬奇 1515 年的笔记本中我们发现了一种 CSP 装置的草图。第一台利用反射镜原理制造的聚光式太阳能装置是 1747 年乔治·路易斯·勒克莱尔·德布冯（Georges Louis Leclerc de Buffon）为法国国王所建造的“阿基米德之镜”，德布冯是根据阿基米德的一个传说来命名这个装置的。传说在公元前 212 年，这位希腊发明家在保卫锡拉库扎（Syracuse）时，在一处悬崖的顶端利用带防护抛光层的曲面镜聚集太阳光来点燃罗马军队的战船。1767 年，瑞士人奥拉斯·贝内达克特·德索叙尔（Horace Benedict de Sausaure）制备了多种类型的太阳能设备，这些设备朝向太阳的一面用玻璃覆盖住以强化温室效应从而提高了性能。18 世纪末期，法国的先驱化学家安托万·拉瓦锡（Antoine Lavoisier）制造了第一具太阳能炉（见图 8.4），它利用液态棱镜聚焦太阳光，其温度达到了当时令人惊叹的铂金熔点温度，约 1800℃（3272°F）。不幸的是，这位贵族在 1789 ~ 1799 年爆发的法国大革命期间被送上了断头台而永远终止了研究。

图 8.3　奥古斯汀·穆肖（Augustin Mouchot）设计的第一个抛物面碟式太阳能收集器

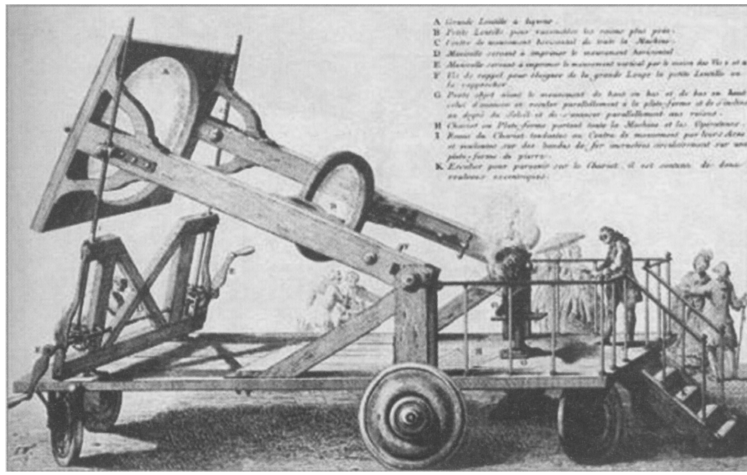


图 8.4　1785 年安托万·拉瓦锡设计的太阳能灶，它利用透镜聚焦太阳光线使温度达到 1800℃（3272℉），可沿着水平轴线旋转以追踪东西轴线上垂直运动的太阳轨迹，该太阳能灶是可移动式的

这些先驱者们的工作为穆肖的成功铺平了道路，他独自在多个方面极大地促进了太阳能的研究和利用，下面列举出这位极具想象力的发明者的部分发明：

1860 年：发明了第一台抛物面碟式太阳能收集器；

1866 年：在巴黎为拿破仑三世演示了其发明的太阳能电动机；

1876 年：制造出第一台太阳能巴氏灭菌器；

1877 年：由法国政府派遣到法属阿尔及利亚的沙漠进行太阳能实验（见图 8.5）；

1878 年：建造了第一台为热机提供动能的抛物面集光器；

1879 年：发明了第一台太阳能制冰器；

1879 年：发明了第一台太阳能热发电机。

穆肖的助手亚伯·皮弗尔制造了由太阳能驱动的印刷机，这种印刷机由直径为 3.5m 的凹透镜聚集太阳能热量于圆筒形蒸汽锅炉上，锅炉驱动一个 0.4 马力（1 马力 = 735.499W）的小型立式引擎，引擎再驱动一个马可尼型印刷机。该系统即使在半阴天的天气

图 8.5　穆肖于 1877 年根据“太阳能热利用中心协会”手册的描述绘制的在阿尔及利亚建造的太阳能装置

条件下也能正常工作。

在工业革命的后半期，因为工业化对能源的需求越来越多，人们对太阳能热能特别感兴趣。从 1868 年到 1875 年，对电动机和电力有许多技术创新、极富想象力的瑞典籍美国工程师约翰·埃里克森设计了太阳能轮毂并于 1872 年在纽约市展出，如图 8.6 所示。他总共制造了 7 台由蒸汽或热空气驱动的“太阳能发动机”。埃里克森在他逝世前 2 年的 1887 年写道：“欧洲因缺乏煤炭而不得不关停磨坊和工厂的时代即将到来，到了那个时候，拥有取之不尽的太阳能的埃及南部地区将会诱使欧洲的制造商把他们的机器和工厂搬迁并安装在尼罗河沿岸的平原上，那里可提供的能力足以驱动超过 100 个曼彻斯特城所拥有的机器装备。”（《机械师和建筑师》，1887 年 7 月）

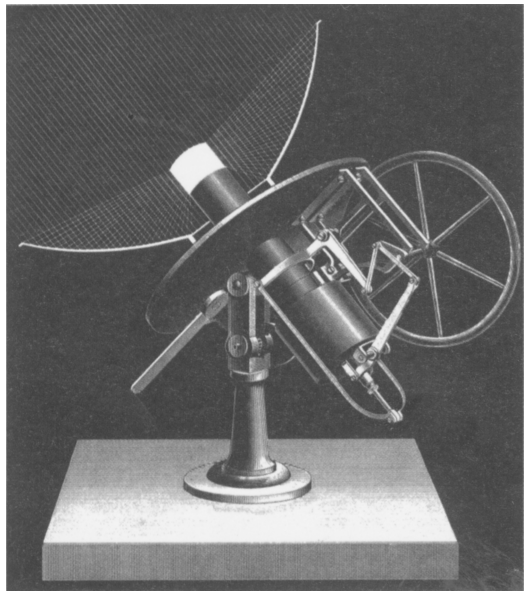


图 8.6　1872 年，约翰·埃里克森设计的用于抽水的“太阳能发动机”

上述这些发展为美国人弗兰克·舒曼在埃及的 CSP 发电站的发展铺平了道路。舒曼创办了“太阳能发电公司”，并梦想着在撒哈拉沙漠上建造 52600km^2 的镜面太阳能收集器，根据其计算，这些收集器可产生 198MW 的电力，相当于 1909 年全世界的总能耗。许多梦想家和开发者现在正重新评估利用世界上沙漠的高温产生我们所需的所有能源的可能性，本章的后面将看到，也许这一切最终将会实现。

与此同时，回到 1874 年，在大西洋的另一端，在智利阿塔卡马高原的拉斯萨利纳斯建造的一个太阳蒸馏器在每个晴天可产生 23369L（5140gal）淡水，这种蒸馏器可连续使用 40 年。1901 年，在美国加利福尼亚州阳光充裕的帕萨迪纳市的一个鸵鸟养殖场，一个直径为 10m（33ft）的抛物面碟式太阳能收集器加热一个 377L（83gal）锅炉，锅炉产生 3.36kW 电力驱动抽水机，每分钟可抽水

5300L（1400gal）。三年之后，另一个主要的太阳能应用先驱者、葡萄牙人马里奥·安东尼奥·戈麦斯展示了其制造的 Pirelióforo 太阳能加热器，该加热器在 80m²（861ft²）的表面上安装了几千个反射镜收集太阳能，温度可达 3500℃（6332°F），足以熔化大多数的金属和石头。该项目获得了 1904 年在美国圣路易斯市举行的世界博览会的两项金奖。

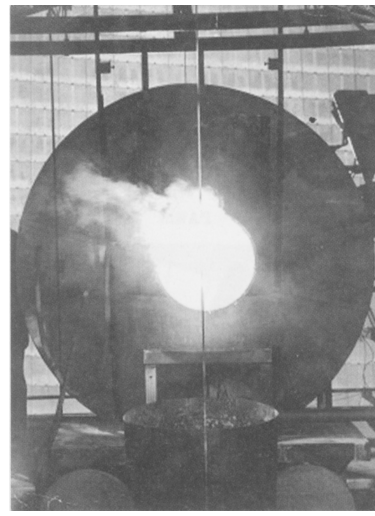


图 8.7　菲力克斯·特隆布（Felix Trombe）建造的位于法国蒙路易的太阳能炉

最后，在现代 CSP 发电站出现之前的发展历史的后期，另一位法国化学工程师菲力克斯·特隆布（Felix Trombe）从 1946 年到 1949 年在法国蒙路易（Mont Louis）先后建造了 2kW 的碟式太阳能收集器和 50kW 太阳能炉，建造的目的是减少使用木材作为燃料（见图 8.7）。这些装置仍然存在并已开辟为游览地供人们参观。特隆布还发明了特隆布墙（参见第 4 章）。

8.2　工作原理

现代集光太阳能热发电站技术采用高反射率表面或者透镜把太阳的热量聚集到加热媒介物使其温度达到高温。太阳辐射经槽式聚光器聚焦之后，其辐射强度可增大 80 倍。聚光器收集到的热量驱动蒸汽机、涡轮机或者斯特林热气机发电，即先把热能转换为机械能再转换为电能。白天收集的热能有时先储存于液体或固体媒介物

如熔盐、陶瓷、水或混凝土中，晚上时再释放出来以保证涡轮机能在夜间工作。例如，装机容量为 49.9MWe 的西班牙安达索尔（Andasol）发电站的 209664 个反射镜收集到的热能除了驱动蒸汽涡轮机，还连接到热储存器中（见图 8.8 和图 8.9）。热储存器的出口温度为 290℃（554℉），而中心温度达 390℃（734℉），它可使发电站的年有效发电时间增加 1000 ~ 2500h。热储存器使用 28500t 熔融盐和钾盐作为热载体，储存的热量可保证发电站在太阳落山之后或多云气候条件下运行 7.5h。每个发电站用两个建造得像热水瓶的大容器储存熔融盐，容器内部的温度可维持几周之久，这意味着在夏季，发电站几乎可以 24h 不间断地发电。由于在驱动蒸汽涡轮机的同时还需要储存热量，因此，带热储存器的太阳能热发电站的太阳能聚光器要比没有热储存器的大得多。

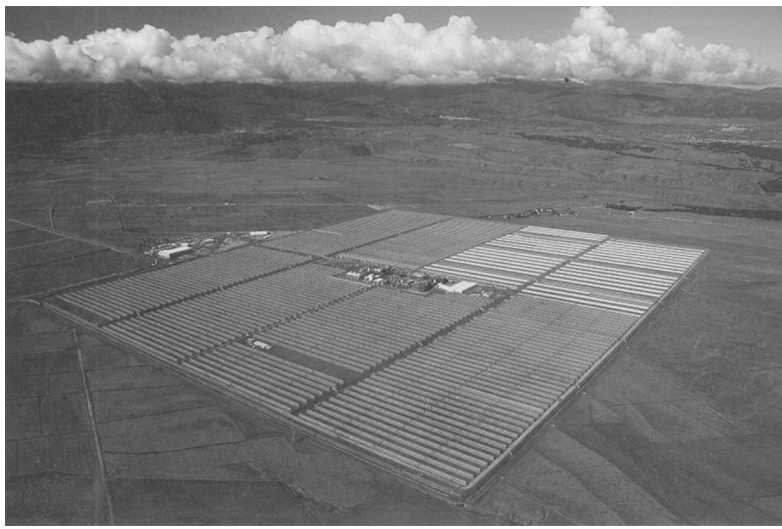


图 8.8　位于西班牙安达路西亚（Andalucía）的瓜地斯（Guadix）附近的安达索尔（Andasol）1 号发电站是欧洲的第一座抛物面槽式太阳能热发电站，2009 年 3 月建成发电。高海拔（1100m；3610ft）和半干旱气候条件使得该地区具有极高的年直接日射量，每年可达 2144kWh/m^2（资料来源：维基共享资源）

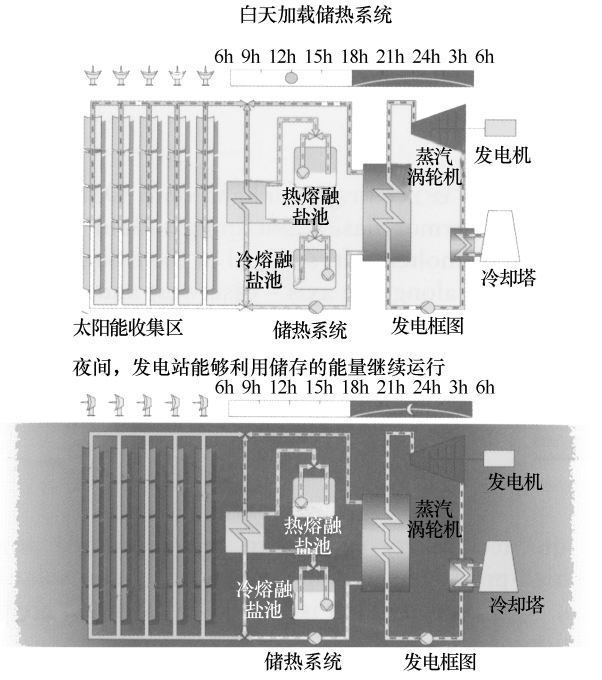
商业化 CSP 系统有 4 种主要形式，它们分别采用线性或点式聚光系统。

1）抛物面槽式系统和线性菲涅尔反射器采用线性聚光形式，可产生 100 倍聚光，温度可达 550℃（1022℉）；

2）中央集热器（又称塔式太阳能系统）和抛物面碟式太阳能系统采用点式聚光形式，最高温度可超过 1000℃（1832℉）。

(a)

图 8.9　（a）安达索尔 2 号发电站，2009 年并网发电。安达索尔 3 号发电站将于 2011 年建成



(b)

图 8.9 （b）安达索尔太阳能热发电站的工作原理（资料来源：© Solar Millennium AG 2008）（续）

聚光太阳能热发电系统主要由聚光器、太阳轨道追踪机构、太阳能接收器、热载体或热储存器、能量转换系统等组成。聚光太阳能热发电系统类型多样，部分还与其他可再生和不可再生能源技术组成混合互补系统。

8.2.1 抛物面槽式系统

抛物面槽式太阳能热发电系统采用大面积槽式抛物面反射镜将太阳光聚集到安装在反射镜焦线上的杜瓦管（工作原理与热水瓶一样）中，对管内的液体如合成热油、热蒸汽或熔融盐进行加热。

槽式采光板通常沿南北方向排列并沿东西方向轴线追踪太阳。液体的温度可达 300 ~ 550℃（572 ~ 1022℉），并在热转换设备中产生过热蒸汽，然后送入常规的蒸汽涡轮发电机内进行发电，也可以驱动蒸汽和燃气互补的发电机。典型的装机容量为 50 ~ 400MWe。

应用：

抛物面槽式太阳能热发电技术最常用于并网发电站，中、高温过程热（见图 8.10 和图 8.11）。到目前为止，最高的单机容量为 80MWe，总装机容量为 500MW，另有超过 10GW 正在建造或规划中。

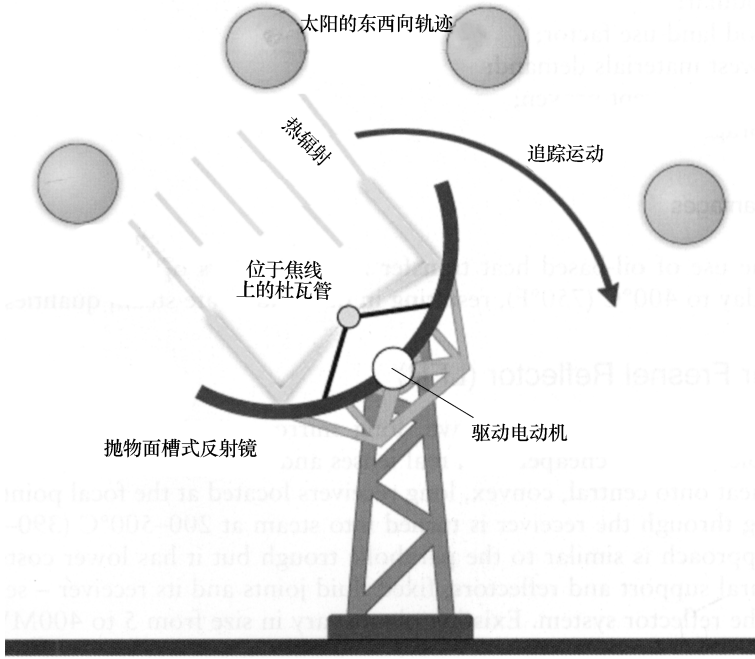


图 8.10　抛物面槽式反射镜装有追踪太阳轨迹的装置

优点：

1）已商业化——具有超过 160 亿 kWh 的运行经验，潜在的运行温度可达 500℃（商业化运行的温度已达 400℃）。

图 8.11　位于美国加利福尼亚州克莱默叉口的抛物面槽式太阳能热发电站（资料来源：维基共享资源）

2）商业化的年净发电效率为 14%（太阳能辐射到电力输出的净转换效率）。

3）可模块化。

4）土地利用率高。

5）最低的材料要求。

6）可联合运行。

7）可以蓄热。

缺点：

以导热油作为传热媒介物限制了目前的运行温度只能达到 400℃，只能停留在中温阶段。

8.2.2　线性菲涅尔反射镜（LFR）

菲涅尔反射镜利用根据菲涅尔透镜原理制造的一排排平坦或略有弯曲的长反射镜（它比实际的透镜和抛物面反射镜更便宜）聚集太阳能热量，加热安装在反射镜焦点上的中枢凸面长吸热管，流过吸热管的水被加热转化为 200 ~ 500℃的蒸汽。其工作原理与抛物面槽式系统相似，但造价更低，因为其支撑结构、反射镜、固定

的液体连接点及吸热管均独立于反射镜系统。现有的该类型的电站的装机容量为 5 ~ 400MWe。

应用：

LFR 发电系统适用于并网发电，也适用于为传统热能发电站提供热蒸汽（见图 8.12 和图 8.13）。目前最大的单体装机容量是美国的 5MW，177MW 装机容量的发电站正在开发中。

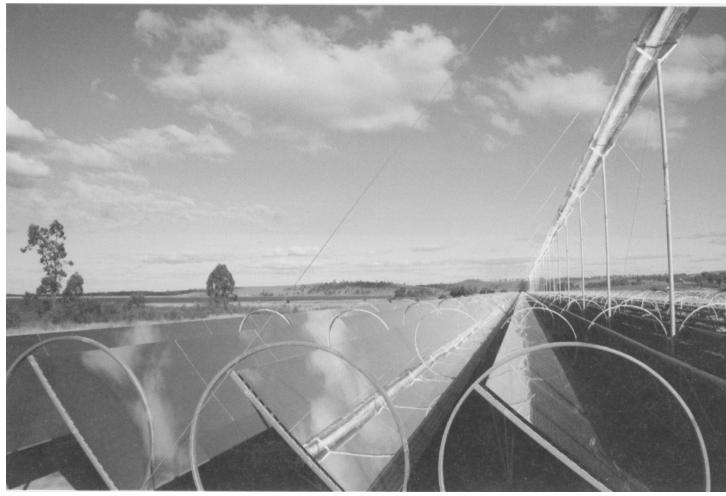


图 8.12　美国内华达州太阳能一号聚光太阳能热发电站的菲涅尔反射镜的效率比抛物面反射镜的低，但价格更低廉。发电站由奥斯拉（Ausra）公司制造（资料来源：维基共享资源，来源于奥斯拉公司媒介部，有自由文档许可证）

优点：

1）即将商业化。

2）造价低。

3）可联合运行。

4）正午时空间效率极高。

缺点：

刚开发成功，只有小型项目处于运行状态。

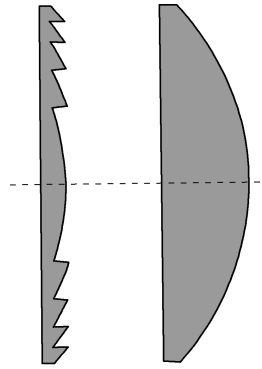


图 8.13　具有等效光强的（1）菲涅尔棱镜和（2）传统平凸透镜的剖面图。菲涅尔棱镜形状类似凸透镜的缩小版但造价更低（资料来源：维基共享资源）

8.2.3　中央集热器或塔式系统

塔式太阳能热发电采用大量组成圆形矩阵的定日镜（追踪太阳的大型反射镜）将太阳光聚集到一个装在塔顶的中央集热器上。集热器对传热流体（水/蒸汽、熔融盐或空气）加热产生高温过热蒸汽驱动涡轮机发电，高温过热蒸汽的温度可达到甚至超过1000℃。若采用加压气体或空气作为传热流体，可利用其效率更高（60%以上）的优点来代替现代石油和蒸汽联合运行的发电机中的天然气驱动燃气轮机。现有商业化发电站的装机容量为 11 ~ 100MWe，容量更大的机组正在开发中。

应用：

适用于并网发电，高温过程热（见图 8.14）。到目前为止最大的单体装机容量是正在建造中的 20MWe 太阳能热发电站，装机容量约为 50 ~ 100MW 的机组正在开发中。

优点：

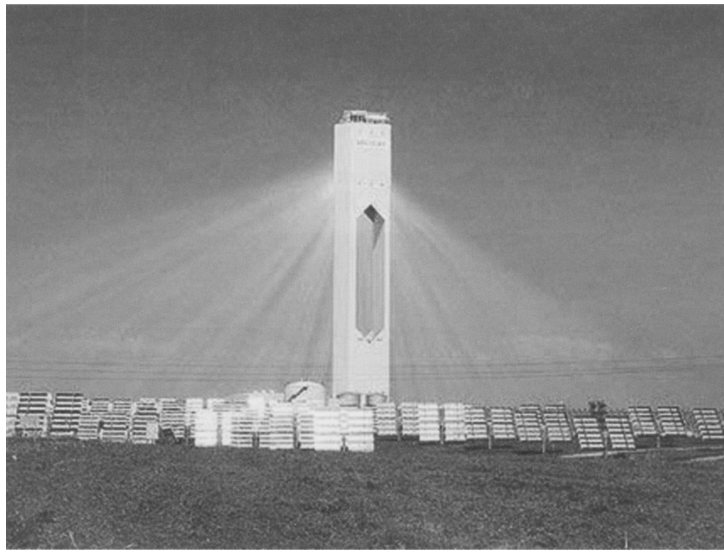


图 8.14　位于西班牙桑路卡拉马尤 11MW 的上排气塔式太阳能热发电站，共有 624 个追踪式反射镜，每个反射镜表面积为 120m^2（1292ft^2）。这些反射镜把太阳光聚集到 115m（380ft）高塔的顶端，在那里水被加热成蒸汽驱动涡轮机发电。2009 年建成，这个被称为 PS10 的电站是该地区首个太阳能热发电站，当地计划到 2013 年建造总装机容量超过 300MW 的发电站。项目完成之后将为周围区域的 180000 个家庭提供充足的电力供应，每年可减小超过 600000 吨 CO_2 排放量（资料来源：维基共享资源）

1）从中期看，具有高的转换效率，潜在的运行温度可超过 1000℃（10MW 量级的电站已可实现 565℃的温度）。

2）可高温蓄热。

3）可联合运行。

4）比抛物面槽式和菲涅尔反射镜更适合进行干式冷却。

5）更适合安装在不平坦的地方。

缺点：

商业化的投资和运行需要大量的证据予以证实。

8.2.4 抛物面碟式系统

抛物面碟式太阳能热发电系统采用碟状抛物面反射镜把太阳光聚集到其焦点上，集热器内的流体或气体（空气）传热媒介物被加热到约750℃，过热蒸汽驱动活塞或斯特林发动机或者与集热器一体安装的小型涡轮机发电。碟状反射镜可沿东西轴线追踪太阳。这种系统可模块化安装，任意数量的碟状反射镜可与现有系统并联起来应用，即可进行系统扩大。

应用：

碟式系统可独立运行，作为无电区域的小型电源，也可以把多台装置并联起来组成大型的并网电站（见图8.15）。到目前为止，单体最大装机容量为100kW，澳大利亚和美国正计划建造100MW和500MW级的碟式太阳能热发电站。

图8.15　由德国斯图加特结构工程公司制造、安装在西班牙太阳能热发电站的6个碟式斯特林发电系统。画面前3个为第2代碟式系统，它们采用德国Solo Kleinmotoren公司的发电机可产生10kW电力（资料来源：维基共享资源/美国桑迪亚国家实验室）

优点：

1）非常高的转换效率，太阳能到电能的峰值净转换效率超过 30%。

2）可模块化运行。

3）最适合高温蓄热和大规模发电站一体化建设。

4）世界上最早出现的太阳能动力项目，有实际运行经验。

5）易于制造和大规模生产，生产部件容易获得。

6）无需水制冷。

缺点：

1）没有大规模商业化运行例子。

2）大规模生产的预计成本目标需要证实。

3）与电网并网时的传送电压较低。

4）联合运行还处于研究和开发阶段。

8.3　环境效益和影响

与以石化作为燃料的火力发电相比，聚光太阳能热发电的成本似乎更高，但是如果考虑环境因素以及隐藏的价值，则 CSP 的平准化成本与火力发电相差无几，比核能发电和“清洁”煤炭发电更便宜。CSP 的建设和投产周期短，没有任何污染或有毒废弃物。另外，由于核能发电和火力发电成本的上升，其可比成本正在逐渐下降。

根据估算，不同类型的太阳能聚光面每平方米（平方英尺）每年可减小 200 ~ 300kg（420 ~ 630lb）CO_2 的排放量。发电站的太阳能聚光器可覆盖很大面积的土地，可能对该处的土地产生一定的影响，生物多样性较差或者说无科学价值的沙漠地区最适合建造 CSP，但是抛物面槽式和线性菲涅尔反射镜系统均需要大量的冷却用水。由于这些 CSP 发电站需要对蒸汽发动机进行冷却，水的需求量很大，而在干旱地区可能无法实现这一点，因此，CSP 发电站必须建在海洋或江河附近。西班牙安达索尔发电站年用水量几乎与

相同地区（由于干旱当地并不种植农作物）农作物如小麦灌溉的用水量一样，每年约为870000m³（1.9亿gal），主要用于冷却蒸汽环路，而这些水会从冷却塔中蒸发掉，这些用水大部分是抽取自当地的地下水。虽然也可以用干式冷却法对过热发动机进行冷却(如用空气)，但与湿式冷却法相比，其成本更高、效率更低。干式冷却的投资额更高，发电成本比湿式冷却高5%～10%。与其他类型的CSP相比，紧凑型线性菲涅尔反射镜（CLFR）技术的电力输出量与占用土地量的比值更高，建造速度更快、成本更低。建造CSP之前，对当地环境影响的评估是非常重要的，例如农业或环境唯一性的地区就不适合建造。

CSP对环境的影响与其他传统热能电力发电站（天然气、煤炭）相似，它可减小使用石化燃料所产生的污染，但建造时需要大量使用原材料——大多数是金属和混凝土。在能源投资回收或者分期偿还贷款期，即发电站生产的电能足以支付发电站建设和设备安装费用所需的时间方面，太阳能热发电站的投资回收期相对较短，约为5个月，比其他类型的可再生能源发电站更短㊀，风力发电站的周期为4～7个月，而PV发电站则需要2～5年。另外，从每平方米的能源产生率方面看，CSP占用的地表面积比PV和风能发电站更少。根据20世纪80年代开始运行的美国莫哈韦沙漠的抛物面槽式太阳能热发电站的经验，其使用寿命可达40年，并且所使用的大多数材料可被回收并用于其他发电站的建设中。

8.4 CSP适用地区

与PV发电站一样，CSP最适用于世界上日照充足的地区，如欧洲南部、非洲北部、中东地区、印度部分地区、中国、美国南

㊀ 根据欧洲太阳能热电协会(ESTELA）和国际能源署太阳能热发电和热化学系统实施协议（IEA SolarPACES）实施的组件预计使用寿命和地表的影响计算。

部、智利北部、澳大利亚，这些地区同时具备发电站冷却所需的峰值功率。太阳能热发电站直接使用太阳光，发电站所处地区的“束辐射”或直接辐照度（DNI）每平方米每年至少为 2000kWh。

CSP 最适用地区是每年直接辐照度超过 2800kWh/m^2 的地区，最好是处于北纬或南纬 40°以内的大草原、丛林、热带草原、半沙漠或沙漠地区，如中东及其附近地区、伊朗、地中海地区、印度的沙漠平原、巴基斯坦、前苏联地区、中国和澳大利亚。多云、多雾或空气沙尘较多的地区不适合建设 CSP，但可考虑建造对气候条件容忍度更高的薄膜 PV 发电站。正在建设之中的位于中国内蒙古鄂尔多斯的太阳能热发电站是最令人感兴趣的项目之一，该项目采用抛物面槽式技术，将于 2020 年建成，装机容量为 1000MW。

在其他条件都相同的条件下，在美国西南部或上埃及地区建造发电站的发电成本将比在西班牙南部或北非沿海地区低 20% ~ 30%，因为这些地区可从直射太阳光获得的能量较后者大 30%（前者为 2600 ~ 2800kWh/m^2/年，后者为 2000 ~ 2100kWh/m^2/年），但若从这一点考虑，南非和智利的沙漠地区无疑是最幸运的，因为这些区域每年可从直射太阳光获得差不多 3000kWh/m^2 的能量，这些地区所在的国家将从 CSP 中获利最多。相反地，在法国、意大利和葡萄牙建造 CSP 发电的成本将是最高的。

在优选地区建造太阳能热发电站，每年 1km^2（0.386$mile^2$）的土地最多可发电 100 ~ 130GWh，而占地面积相等的传统燃煤或燃气中等荷载火力发电站每年只能发电 50MWh。但这些地区通常不需要这么多的电力供应，因此，把这些电力输送到人口密度更大地区的“超级电网”计划已经在建设中。最先进的计划是欧洲的超级电网，德国已经在认真考虑从非洲北部和欧洲南部进口太阳能电力。

8.4.1　最近正在进行的项目

在本书编写期间，全球约有 20 个项目已建设完毕并已发电 736.15MW；有 33 个项目正在建设中，其中 4 个位于西班牙，总装

机容量超过2000MW（2GW）；另外，已宣布将建设的发电项目有美国的10GW，西班牙的2GW，其他国家的7GW。西班牙是太阳能热发电技术的先驱国家，世界上首批CSP发电站的三座就位于西班牙，它们分别为安达索尔太阳能发电站（100MW）及PS20（20MW）和PS10（11MW）塔式太阳能发电站（参见图8.8和图8.14）。美国则拥有最大的太阳能发电站：354MW的“太阳能发电系统”发电站加上“内华达州太阳能一号”发电站（64MW），如图8.12所示。中国计划在内蒙古建造2000MW的抛物面槽式太阳能热发电站。

联合运行发电站也是完全可行的，事实上已有这样一座发电站在运行。2008年建成、位于澳大利亚猎人谷内马维斯布鲁克附近的奥斯拉9MW CLFR发电站为邻近的装机容量为2000MW的利德尔燃煤火力发电站提供太阳能热蒸汽，这些热蒸汽可减小发电站的部分煤炭消耗，这真是向后石化燃料时代变迁的一个象征！

8.4.2 经济效益

CSP技术的发展非常迅速，其可降低成本的因素包括技术的发展、规模化生产、规模效益以及运行方式的改进等。在电网中并入更多的CSP系统可使电力价格保持平稳，避免由于燃油紧缺和碳成本法则生效之后导致的电力价格急剧上升。

美国的经验表明，在太阳辐射非常充足的地区，太阳能热发电的成本约为15美分/kWh（见图8.16）。CSP不像火力或核能发电那样需要长期补贴，它只需要自身的初期投资。在CSP发电站的生命周期内，其成本的80%为建设费用及其利息，运行费用只占成本的20%。因此，一旦收回投资成本，在接下来的20～30年间，只剩下目前约为3美分/kWh的运行成本。CSP的发电成本低于任何竞争对手，与已经收回长期投资成本的水力发电相当。

图 8.16　一些可追踪太阳的 CLFR 把太阳光聚集到同样水平安装的集热管中，这种结构可提高该发电站的效率。该电站位于美国加利福尼亚州南部的金伯利那（Kimberlina），装机容量已扩大到 177MW。建造该电站的小公司奥斯拉（Ausra）公司已于 2010 年被开始涉足太阳能热发电领域的法国大型核能公司阿海珐公司收购。预计 CLFR 技术将成为太阳能热发电技术的市场领先者，因为它价格便宜，建设周期短，电力输出量相同情况下，其用水和用地量只有竞争对手的一半（资料来源：© Ausra）

8.5　发展前景

CSP 正日益受到重视，欧洲太阳能热电协会（ESTELA）和国际能源署太阳能热发电和热化学系统实施协议（IEA SolarPACES）认为，该技术已足够成熟，可在全球日照充足地区呈指数式上升。它们声称截至 2008 年年底，已建成的 CSP 仅为全球提供 436MW 的电力供应，但在本书撰写期间即到 2011 年左右，正在建设的 CSP 至少可再增加 1000MW 的供应量，阿布扎比酋长国最近刚宣布建设 100MW 的夏姆斯 1 号（Shams One）CSP 发电站。

澳大利亚正计划在沿海建造一座联合运行发电站，该电站由 150MW 燃气涡轮发电站和 50MW 抛物面槽式太阳能热发电站组成，

该电站可生产电力、淡化水和可供商业化销售的盐。美国已计划再增加7000MW的发电项目，西班牙则计划增加10000GW，这些项目均可在2017年并网发电。抛物面碟式系统可高度模块化，但到目前为止，大多数均不是大规模商业化的并网发电系统，而只是小型的局域项目。最大项目之一为德国斯特林能源系统公司的“桑凯驰”（Suncatcher），其碟式反光镜的直径为12m（38ft），使用斯特林发电机，装机容量为25kW，但是，正在建设中的位于美国加利福尼亚州沙漠地区的项目计划安装70000个“桑凯驰”，装机容量为1750MW。

最令人兴奋的项目为“沙漠技术”（Desertec）项目，它可能是欧洲最有革命性和最有野心的能源项目，该项目的建成将有助于延续约翰·舒曼在沙漠地区建造巨大的发电站为全球提供电力的梦想（见图8.17）。该项目的目标是到2050年，为欧洲、中东地区和北非地区提供15%的电力供应，聚光太阳能热发电型的发电站沿中东地区和北非地区的海岸线建设并接入一条高压直流输电网，该输电网还与北欧近海地区的风力发电站相连。“沙漠技术”项目由德国几大公司包括意昂（E. ON）、莱茵集团（RWE）和西门子（Siemens）组成的联合企业领导，成员企业还包括来自西班牙、意大利、法国、摩洛哥和突尼斯的5家企业。沙漠产业行动计划首席执行官保罗·范松（Paul van Son）指出，这项总投资为4000亿欧元的长期计划将在10年之内交付其首期项目，而首要任务是建设输电电网。

“沙漠技术”的投资者希望该项目还能为北非和中东地区提供淡化水。若用沿海的海水代替饮用水作为发电站冷却用水，250MW的太阳能收集区可驱动200MW涡轮发电机，冷却发电机用的海水经淡化，每天还可提供100000m^3（超过每小时400万L）饮用水。

根据“2009年全球CSP展望”预计，若采用能效等级较高的先进产业发展方案，到2030年，CSP将满足全球电力预计需求量

“沙漠技术”— 欧洲、北非和中东地区可再生能源发电站计划

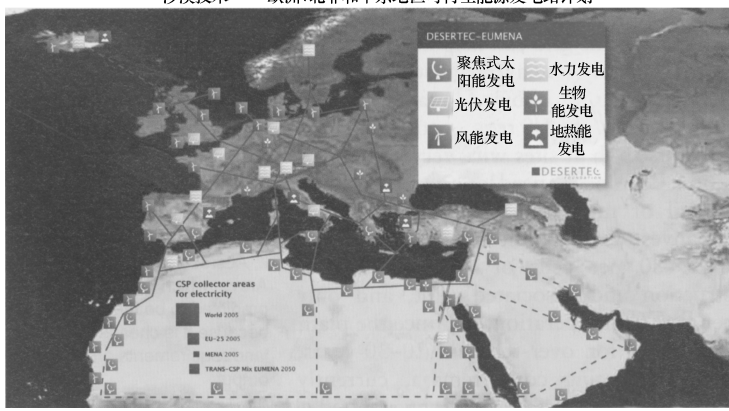


图 8.17　“沙漠技术”（Desertec）项目提出的高压直流电输电网示意图，该输电网用于连接阳光充足地区的 CSP 发电站和欧洲其他地区可再生能源发电站。“沙漠技术”基金的主任蒂莫·格鲁普博士相信尽管短期看，该项目有所延期，但从更长周期看，与该地区国家的合作将有助于项目的推进（资料来源：© Desertec）

的 7%，2050 年将达到 25%，并且可创造 200 万就业机会。即使对未来市场发展做更保守的估算，到 2050 年，全球各种类型太阳能发电站的装机容量将超过 830GW，年增加速度为 41GW。按此计算，到 2030 年，将占全球电力需求量的 3.0% ~3.6%，2050 年为 8.5% ~11.8%。

8.6　太阳能塔

太阳能塔（又称为太阳能烟囱）是利用太阳能发电的第三种类型，它利用空气的压力差驱动发电机发电。安装于地平面的大型圆形集热棚暴露于太阳光之下，被吸入集热棚的空气由于吸收太阳光而被加热。受热空气膨胀上升，由于强烈的烟囱效应而被吸入烟囱中，上升的气流推动涡轮发电机的叶片从而使发电机旋转发电。

目前还没有大规模太阳能塔的例子。由工程教授耶尔格·施莱希（Jörg Schlaich）设计的 50kW 原型机建造在西班牙的曼萨纳雷

斯，共运行了8年，到1989年报废。一家名为EnviroMission的公司希望在美国的亚利桑那州建造200MW的太阳能塔发电站，该发电站的涡轮发电机将达326.25MW，塔的高度将达1km（3280ft），底面积超过几平方千米，上升气流将被加速到70km/h（43mile/h）。由于耗水量很小，EnviroMission公司认为该技术特别适用于澳大利亚干燥、炎热的地区（见图8.18）。

另一种未经测试的太阳能塔类型是在地平面加热水产生水蒸气来发电。由于水是一种有效的储热媒介，它可把热量储存到夜晚使用，因此从理论上讲，它可以昼夜不停地运转。该方法的改进是使用获得专利的盐类太阳能储热技术，它由德国科学家大卫·道德里奇提出，目的是使位于沙漠地区海岸线附近的发电站同时能提供洁净的淡化水，以及能为发电站附近地区带来降雨的雨云。截至本书编写的时候，该技术相关的开发公司仍然在为这些大型项目寻找资金支持。

8.7 温差发电

太阳能发电技术的另一种类型为热电、热离子或热伏打器件，这些器件把不同材料间的温差转换为电流。温差发电现象由科学家托马斯·塞贝克于1821年首次发现，让·珀耳帖进行了详细的研究，有时也称为塞贝克—珀耳帖效应，奥古斯汀·穆肖于19世纪80年代首次提出可用它来储存太阳能，现在它已成为世界几种前沿纳米技术之一。珀耳帖效应也可用于制冷（见图8.19）。

一些材料如分子量级的金刚石薄片被加热时将释放出电子，在温差电池中，这些电子越过几百微米宽的真空层（避免产生热对流），在真空层的另一端被薄膜所吸收从而产生电流。英国布里斯托大学纳米科学和量子信息研究中心的物理学家尼尔·福克斯（Neil Fox）证实，由于温差电池没有运动部件，其可靠性和效率非常高。美国一家名为MicroPower Global的公司拥有类似的专利，并宣称已研制出采用该方法的微型集成电路芯片模块。温差发电应用系统可能包含温差电池片、模块、装配部件以及封装系统。

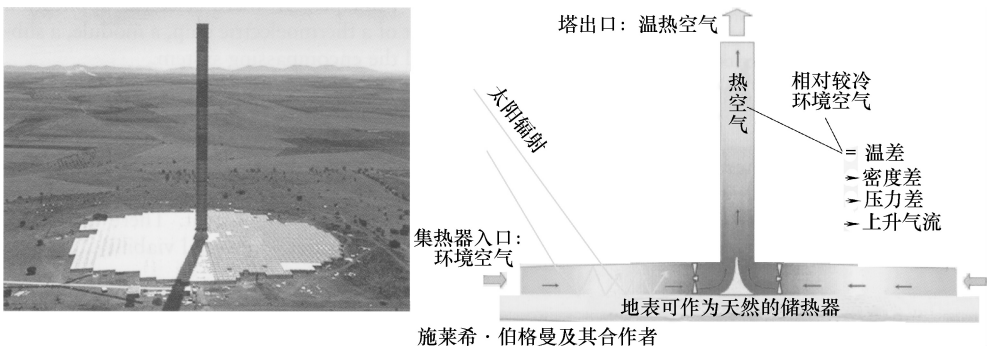


图 8.18　EnviroMission 公司的试点太阳能塔发电站及其概念示意图(资料来源:EnviroMission)

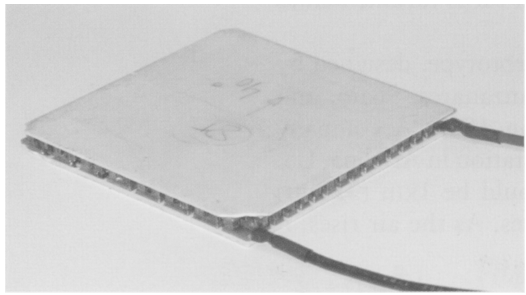


图 8.19　珀耳帖元件的两种不同金属导体通电之后在接头处便会产生吸热或放热现象，该过程是可逆的（资料来源：© Creative Commons）

这种器件除了可以使用太阳能热，还可以使用其他设备如传统发电站、内燃机、数据服务器集群中被浪费掉的废热，这些设备消耗的能量的 60% ~70% 将变成毫无用处的热量。温差发电器件目前在实验室的效率为 10% 左右，要达到商业可行性应用还需要攻克许多技术难关。

第9章 总　结

在本书的不同章节，我们预测各种不同的太阳能应用技术和实践的发展趋势。毋庸置疑，主要的发展领域为太阳能建筑、太阳能制冷、太阳能发电站、离网的小规模农村电气化和分布式发电技术。

随着城市规模的不断扩张和越来越多的世界人口涌入城市，采用被动式太阳能建筑设计来满足建筑的供暖与制冷需求有着巨大的发展潜力，充分利用太阳辐照以及采用类似于“被动太阳能房”的建设标准，有助于控制建筑物在供暖与制冷方面的需求导致的电力需求的增长率。在这一方面，最有效的方法就是政府修改其建筑管理条例和标准，再对建筑管理人员进行大量的培训，以使他们了解被动式太阳能建筑、超绝热建筑的工作原理以及应该如何应用这些技术。

太阳能制冷目前的市场渗透率还很小，还有很长的一段路要走，但不论被动式（通过建筑设计）还是主动式（通过太阳能驱动的制冷设备），太阳能制冷都有巨大的发展潜力。一个最明显但却最容易被忽视的事实是，用于制冷目的的太阳能恰好在最需要制冷的时候其辐照是最大的。

聚光太阳能热发电（CSP）有着光明的前景，它使用已有130年历史的成熟技术，在世界上日照充沛的地区利用太阳能热量来发电。这种发电站的建造速度相当快，比核电站要快得多。当然，它们也需要建设输电网络将电力输送到最需要的地方。太阳能发电站在以下几方面比核能更具优势：

1）燃料源永不枯竭。

2）因此这个技术永远不会过时。

3）它是可预测的和可靠的（在日照充足的地区）。

4）它是完全免费的。

5）它更安全。

6）以每 MW 的平准化生产成本计算，价格更低廉。

7）它的开采不会引起冲突（在非洲多个地区开采矿产总会引起冲突）。

8）它完全没有污染，而核能对工作人员具有辐射危害，其废弃物的毒性可持续好几万年。

从建设的速度、节水、成本效益等方面看，最有前途的 CSP 技术是紧凑型菲涅尔棱镜反射镜（CFLR），我们预计在未来的几年中将会有很多这样的发电厂建在日照充足的地区。

对于数以亿计仍无电可用、数百万仍没有新鲜的、干净的饮用水的人们来说，太阳能以及风能（取决于地理位置）有可能会改变他们的生活，并有助于他们在许多方面达到联合国千年发展目标的要求。

分布式能源，也就是家庭、建筑物或社区在本地生产满足自己用电、供暖或制冷需求的电力，是另一个巨大的发展领域。分布式能源的好处在于，电力自给自足，这样可以减少输电损耗和提高系统的效率。但是，规模太小的分布式能源则不具经济效益，因为这种情况下，系统需要很多重复的、不必要的组件，如逆变器（每栋房子都需要一个逆变器，而不是一条街才需要一个）。因此，对于农村、街道或城镇规模的可再生能源应用，只有社区成员一起负担各自的能源消耗费用、了解可再生能源对于他们生活的意义时，可再生能源才能在社区重建中发挥其作用（见图 9.1）。

长久以来，能源需要付费被当做理所当然的事。能源消费者需要了解他们的用电模式对总用电需求的影响，以及应如何降低自己的能耗，同时“智能电网”的出现有助于控制或平滑用电峰值负载从而减少发电厂的总装机容量。

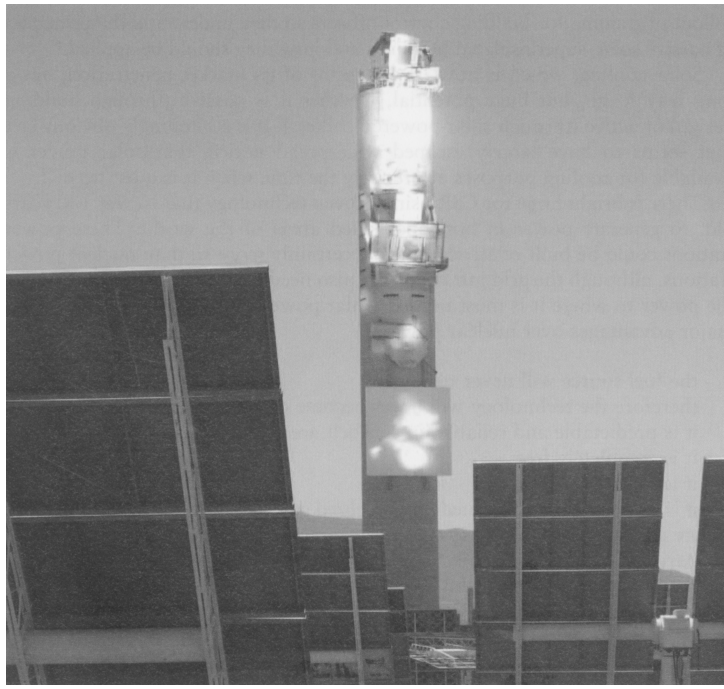


图9.1 西班牙阿尔梅里亚的太阳能研究项目 CIEMAT-PSA 中的 CESA-1 塔式太阳能发电站（资料来源：© SolarPACES）

专栏9.1 不同太阳能能量转化系统的转化效率

图9.2和表9.1给出了不同太阳能发电技术的相对转化效率的一个估算值。总体转化效率取决于照射在太阳能发电站面积上总太阳能辐射量以及太阳能面板的净发电量（注意：碟式或槽式太阳能聚光器仅占发电站总面积的一小部分），它与地理条件有很大的关系。另外，归根到底，最重要的还是每kWh发电量的成本。

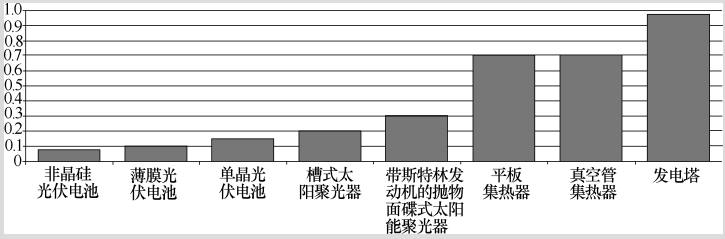


图 9.2　不同太阳能能量转化系统的转化效率

在表面积最优化应用方面，安装在桑迪亚国家实验室的国家太阳能热测试仪上的单个碟式太阳能聚光器上的斯特林发动机最多可发电 25kW 左右，但其占地面积比西班牙的塔式太阳能发电站小 100 倍。位于加利福尼亚州南部、装机容量为 500MW、占地面积为 1800 公顷（4500 英亩）、由南加利福尼亚州爱迪生公司（SCE）和斯特林能源系统公司合建的太阳能发电站预期的发电量为照射在其 18.2km^2（7mile^2）面积上的日辐射量（1kW/m^2）的 2.75%。靠近西班牙安达卢西亚省瓜第克斯村（总面积为 195 公顷）的 AndaSol 49.9MW 的商业抛物面槽式聚光太阳能发电站的年均总转化效率为 15%（集热器自身的效率为 50%，其余的是系统损耗）。

表 9.1　转化效率

技　术	近似效率	输　出
非晶硅光伏电池	0.08	电能
薄膜光伏电池	0.1	电能
单晶光伏电池	0.15	电能
槽式太阳能聚光器	0.2	电能/热能
带斯特林发动机的抛物面碟式太阳能聚光器	0.3	电能
平板集热器	0.7	热能
真空管集热器	0.7	热能
发电塔	0.97	电能/热能

9.1 氢能经济

在过去的40年中，已经有大量的关于“氢能经济”的讨论。人们一直梦想着能利用太阳能发电从水分子中电解分解出的氢气作为燃料用于一些设备尤其是运输工具中，并最终取代化石燃料。这一能源解决方案的“圣杯”具有经营成本低（假设有广泛可用的水）且零污染的特点，但实现这一神圣目标之前还有很长的路要走。目前仅4%的氢气是由水的电解获得的；大多数（90%）来自于各种化石燃料的“分解”。

在氢能经济中，效率更高的燃料电池将取代内燃机作为汽车的发动机，然而，目前制造燃料电池所需要的能量是其使用寿命内可产生的能量的2.5倍。在氢能经济实现之前必须解决的一个技术问题是发明一个可用于汽车、能够安全地储存易燃的压缩氢气的基础架构。这是非常重要的，因为氢气的分子最小，很容易泄漏且与石油相比，其能量密度更低，它可能导致其输运管道和储罐易碎——除非它们涂上一层特殊的防护涂层。科学家们已尝试了许多不同类型的存储方式，包括地下存储方式——英国化学工业公司（ICI）已成功地应用了很多年。

用太阳能电力生产氢气，每生产1kg氢气至少需要50kWh的电力（但这个数字在逐渐减少，见下文），并且需要在高温——800～1200℃条件下才能把水分解成氢气和氧气。为此，科学家们利用建成于2008年、位于西班牙的德·阿尔梅里亚地区的光伏平台的100kW工业规模聚光太阳能热发电系统——Hydrosol-2进行了水电解氢气的试验（见图9.1）。与所有的太阳能发电站一样，该电站是模块化结构，且易于按比例扩大规模。利用聚光太阳能热发电（CSP）和电解法生产氢气，若太阳能热发电的费用为0.08美元/kWhel，则其预计成本为0.15～0.20美元/kWh，或者6～8美元/kg（H_2）。[⊖]美国2017年的目标成本为3美元/gge（等量汽油加

⊖ Solar Fuels from Concentrated Sunlight，SolarPACEs/IEA，2009.（从汇聚太阳光获得的太阳能燃料，SolarPACEs/国际能源署，2009）

仑量；1gge 约为 1kg H_2），而欧盟 2020 年的目标值为 3.50 欧元/kg（H_2）。除了电解法，使用聚光太阳能热技术通过热化学法生产氢气也正被广泛地研究，美国和欧洲初步研究表明与用 CSP 的水电解法相比它具有成本优势，以当前石油价格看，其成本甚至能与传统的基于化石燃料的氢气生产方法相比拟，尤其实施了 CO_2 减排和防止污染的信用制度之后。氢气的这种集中式生产仍然需要储存装置，或者通过管道输运到使用位置。

为什么不直接在使用点利用太阳能光伏以电解法生产氢气呢？本田汽车公司就是这方面的先驱者，该公司设计制造了可用于家庭或工作单位的燃料电池电动汽车专用加气站（见图 9.3）。这个原型机可在 8h 内生产充足的氢气（0.5kg）满足日常交通通勤需求（每年行驶 16093km 或每天 290km；每年行驶 10000mile 或每天 180mile）。它采用一个功率为 6kW、已获专利权的由 48 个薄膜 CIGS 平板太阳能嵌板组成的光伏阵列，它生产 1kg 氢气需要的电量为 16kWh，它使用了一个创新的高度紧凑的大压差电解液而无需使用压缩机。该装置可与该公司的 FCX Clarity 汽车联

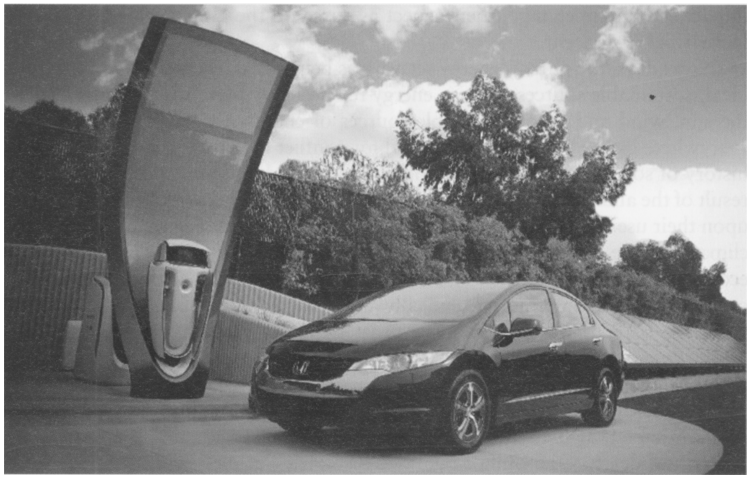


图 9.3　本田汽车公司研制的由太阳能光伏电池供电、可在家庭或工作场所为氢燃料电池电动汽车加氢气的加气系统（资料来源：© Honda）

用，同时还带有一个“智能电网”供能系统，可将剩余电力并到电网中。

只有部分汽车厂商在研究氢气作为汽车燃料，这是因为目前其效率比其他燃料更低，使用锂离子电池的电动汽车的效率大概是其 3 ~ 5 倍。因此很可能在不久的或较中期的未来，我们将在路上看见越来越多的电动汽车，同时，越来越多的来自不同来源的可再生或低碳的能源生产的电力并入电网。

9.2　脱离对化石燃料的依赖

历史悠久的地球为我们奉献了化石燃料这份厚礼。在过去 300 多年的时间里，人类通过越来越多的创造性方式用它来替代过去数个世纪人类生产和运输的主要方式——人力和畜力，由此创造了当今世界五分之一人口充分享受到的，以及其余人口希望享受到的非凡成就和文明。在这些化石燃料被发现和工业革命开始之前，能源来自于燃烧生物质，同时也来自水能和风能等可再生资源，并且这些产生能源的方式一直沿用至今。

不过早在 19 世纪 70 年代，富有远见的太阳能技术先驱，如奥古斯汀·穆肖就预见到煤炭总有被耗尽的一天，他们开始研发用太阳能代替煤炭获得能源。1913 年，弗兰克·舒曼，世界上第一个太阳能发电站的设计者，曾畅想全世界完全由太阳能提供能源。当时它只有理论上的可行性，现在它有了实践层面的可行性，妨碍实现这种可行性的根源在于得到化石燃料更简单和廉价。然而在过去一个世纪里，不同民族和国家之间为了争夺这些化石燃料资源的使用权屡屡发生暴力冲突，带来苦难、大规模的破坏和死亡。一个国家领土内的石油、煤和天然气资源带来的不幸和福祉一样多。随着人们对气候变化影响的认识的提高，在全球范围内化石燃料资源使用带来的坏处变得越来越明显。

现在，那些想寻找本地区可持续的、洁净的能源来替代有污染的化石燃料的人士常提及“能源安全”一词。这是因为阳光、风和其他可再生能源广泛分布全球，取之不尽，并且无使用权之争。

回顾太阳能技术的历史，其发展过程显而易见地受到了储量丰富的化石燃料的阻碍。毫无疑问，当今世界经济的发展依赖于化石燃料的使用，尽管所有的科学证据都证明灾难性气候变化的迫近是人类长久使用这些燃料的结果，但依赖于它们的公司和经济体仍以不变的热情使用甚至开采它们，人类正在越来越多地从技术上和地理上都极具挑战性的地方开采石油，从巴西沿海的海底到北冰洋的海底，而具有讽刺意味的是正是由于全球变暖才使这些地方的石油更易于开采。

在希腊神话中，普罗米修斯为了全人类的利益从众神手中盗取了火种，但是众神通过潘多拉魔盒来惩罚人类，当这个魔盒打开时，疾病、烦恼和死亡首次降临到人世间。我们不得不承认，化石燃料和核能对于人类来说，与潘多拉魔盒有相似的地方。人类，或者人类的领导者现在面临着一个明确但又两难的选择：是维持现状和既得利益，但这势必会进一步加剧人类化石燃料的依赖；还是加快节奏，部署、研究和开发太阳能和其他可再生能源、可持续的技术和实践，这些技术有可能是完全干净和可靠的。如果人类继续这样维持现状，那么已被科学论据证实的温室效应最终将不可避免地失去控制。人类别无选择，不能再这样冒险下去了。

第10章 太阳能相关信息资源

10.1 可用能源量

为了利用太阳能，我们有必要了解某个特定地点的可用能源总量（见图 10.1 和表 10.1）。现在大部分国家都有提供指定区域每年的可用太阳能总量的日晒地图的图解。图 10.4 和图 10.5 分别是非洲和欧洲地区的日照能量分布图，但这两张图提供的信息不同。图 10.4 为 1985 ~ 2004 年期间每天照射到水平面的年平均日照能量。重点是其单位为 Wh/m^2。图 10.5 为处于朝南最佳倾角的光伏组件收集到的日照能量分布图，其单位是 kWh/m^2，该图也预估了

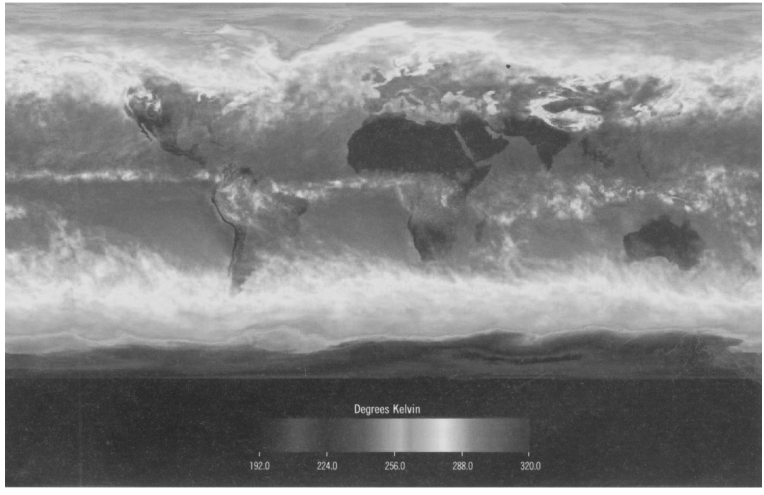


图 10.1 美国国家航空航天局提供的世界上阳光最充足的区域（暗红色）图

功率为1kW、效率为75%的光伏系统所能产生的电能（实际效率会有所变化）。

10.1.1 MESoR

MESoR（Management and Exploitation of Solar Resource Knowledge，太阳能资源管理与开发利用的知识）是由欧盟委员会资助项目建立的综合门户网站，该网站旨在利用基于地图图形的用户界面非常人性化地提供许多关于太阳能数据免费资源的入口（见图10.2和图10.3）。这些资源包括NASA、PVGIS、SoDa、HelioClim、NCEP、SWERA、METEONORM和Meteo Test等。在该网站上用户输入他们的位置，然后选择输出格式，也可在谷歌地图上标示出相应图层。该网站的工作是不间断地结合并协调多种数据，提供质量控制以提高最终数据的可靠性。接下来的篇幅会对部分数据资源进行论述。将来会有更高分辨率的地图用于光伏电站更精确地选址。

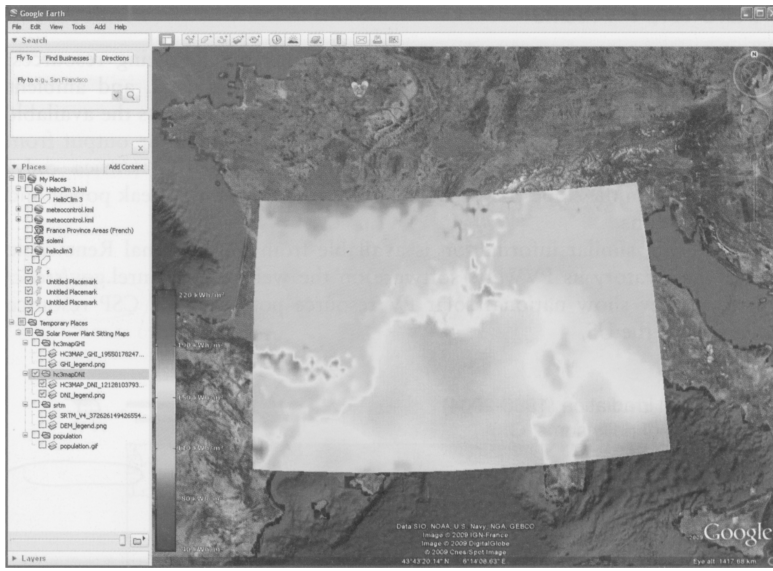


图10.2　MESoR数据截屏（资料来源：© EC/MESoR）

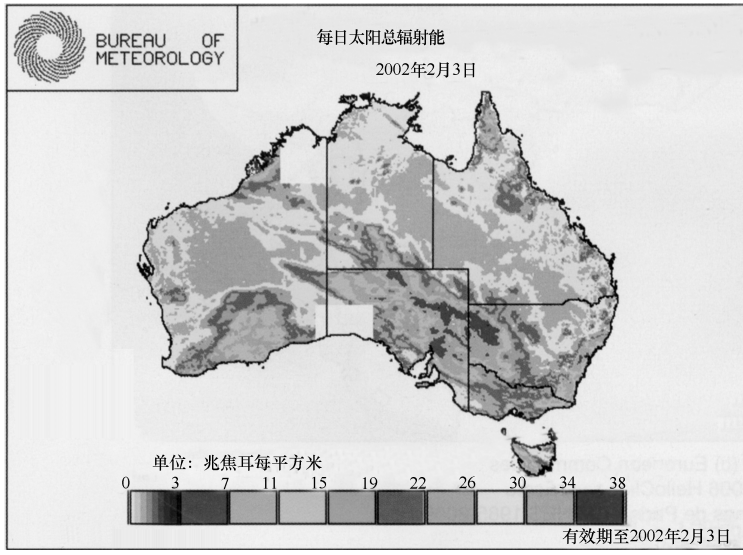


图 10.3　MESoR 上的澳大利亚总太阳辐射量数据（资料来源：© EC/MESoR）

10.1.2　HelioClim-3

HelioClim-3 可以分析计算气象卫星得到的图像，从而为欧洲和非洲提供 15 分钟到 1 个月的辐照度数据。Meteonorm 通过插补气象网测量结果提供全球太阳总辐射的月平均值（10 ~ 20 年间）。Solar Energy Mining（SOLEMI）也可以提供从气象卫星图像采集得到辐照度数据，包括全球水平面总辐照度（GHI）和直接辐照度（DNI）。这些数据组包括 1991 ~ 2005 年（欧洲和非洲）以及 1999 ~ 2006 年（亚洲）的。SoDa（太阳辐射数据网）也能提供类似的全球辐射数据和免费地图。

10.1.3　PVGIS 和 PVWatts

PVGIS（http：//re. jrc. ec. europa. eu/pvgis）包含以下资源：

欧洲、非洲和亚洲西南部的太阳辐射数据，欧洲环境温度，地形和土地覆盖（见图 10.4～图 10.7）。它能评估有效的太阳辐射以及能接收得到太阳辐照的地表，进而利用倾斜角和太阳方位角得到安装在能接收到太阳辐射并且辐射能量为峰值的并网光伏发电系统的产量和独立光伏发电系统（只是非洲）的产能情况。

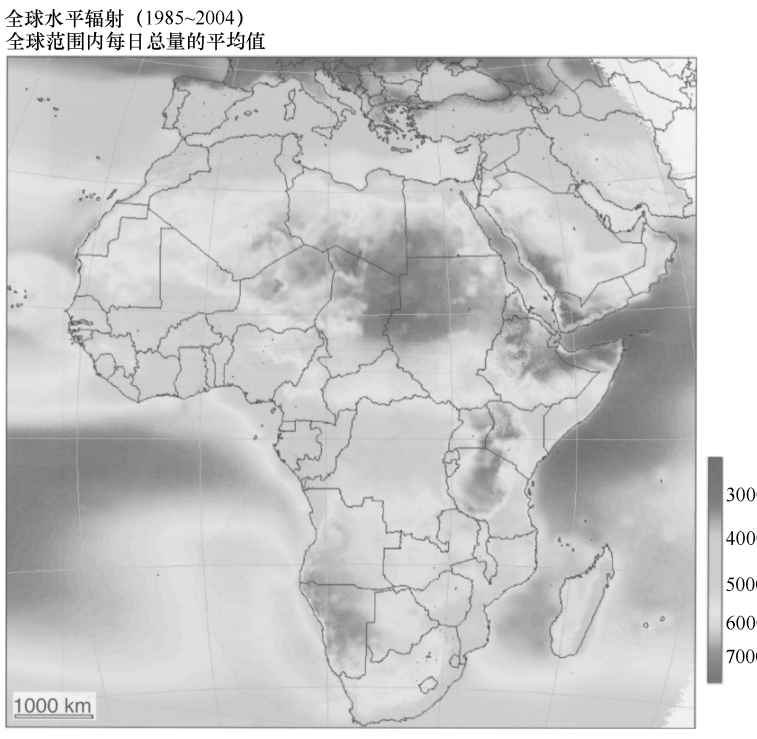


图 10.4　由 PVGIS 欧盟网站提供的非洲大陆太阳辐射量分布图示例（资料来源：PVGIS © European Communities，2001—2008）

欧洲地区光伏太阳能发电潜力

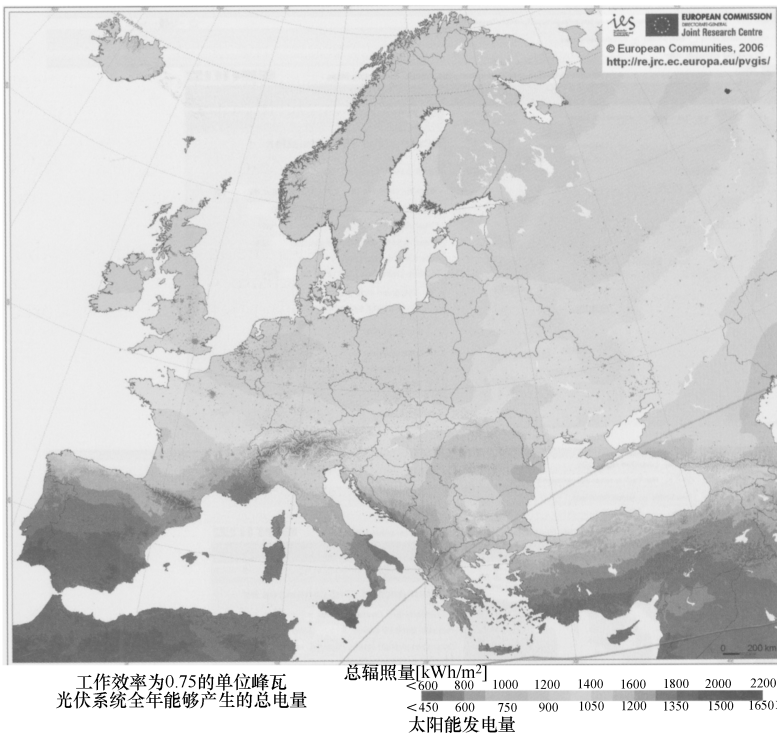


图 10.5　由 PVGIS 欧盟网站提供的欧洲太阳辐射量分布图示例（资料来源：PVGIS © European Communities，2001—2008）

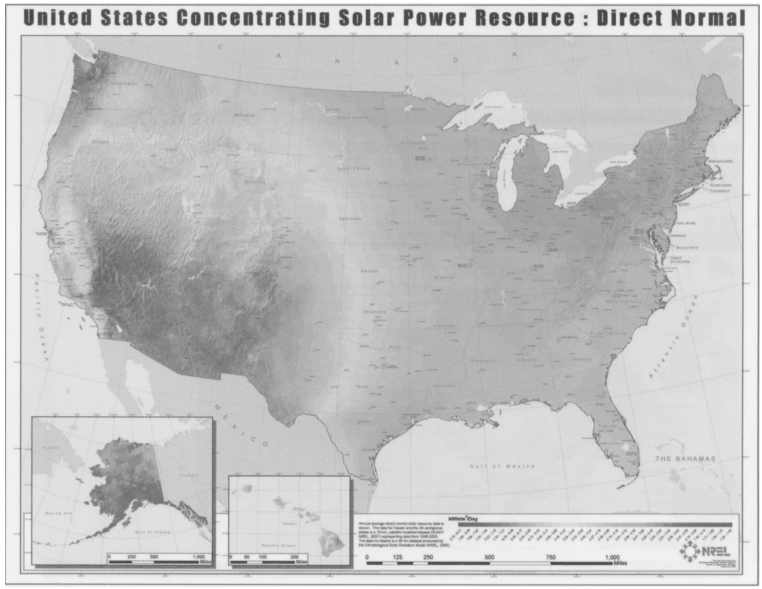


图 10.6　美国年平均直射日照图（单位是 kWh/m^2），可用来指导最大程度地利用太阳能。最暗红区域是日照最强区，为每年 8.31 kWh/m^2，日照最弱区（淡紫色区域）每年为 1.25 kWh/m^2（资料来源：National ReneWable Energy Laboratory，2008）

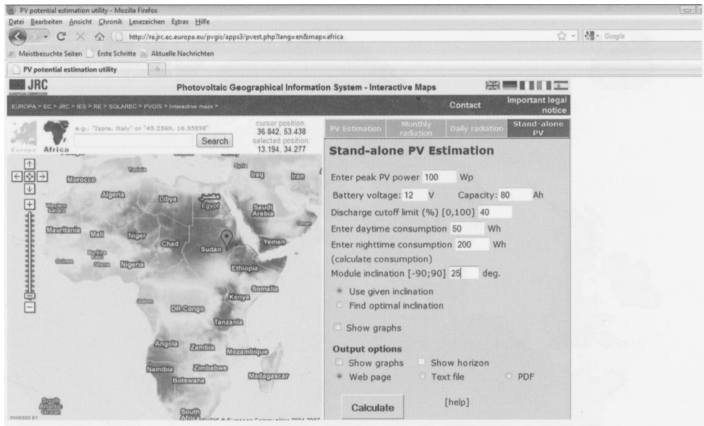


图 10.7　PVGIS 处理用户输入数据的一些截图（资料来源：PVGIS）

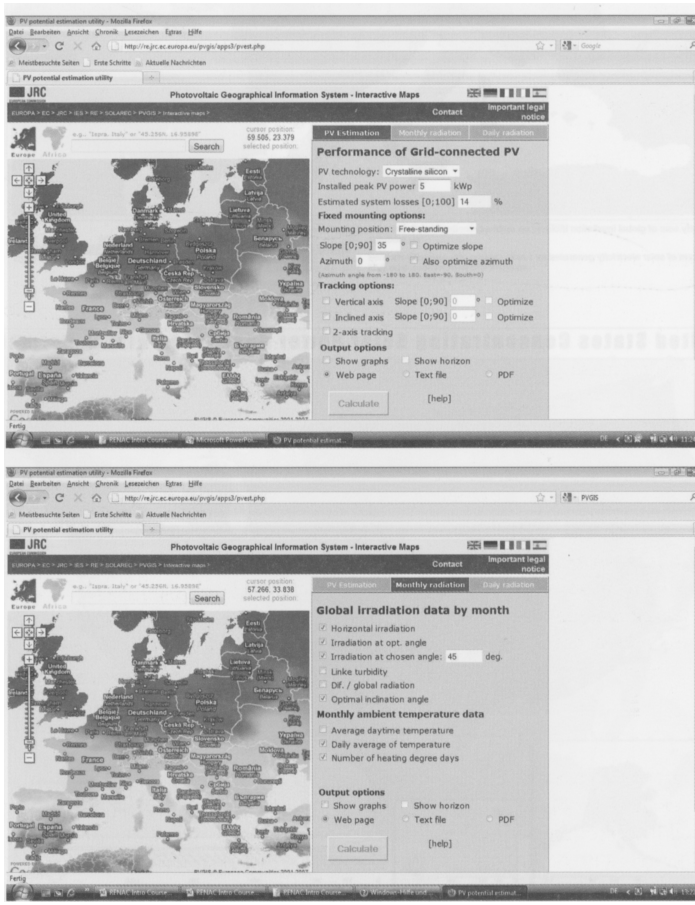


图 10.7　PVGIS 处理用户输入数据的一些截图(资料来源:PVGIS)(续)

在美国国家可再生能源实验室网站提供 PVWatts 软件，网址是 www. nrel. gov/rredc/pvwatts，从这可以得到类似的太阳能信息，从而得到美国光伏太阳能发电和聚光太阳能发电的潜力。

10.1.4　NASA 上关于地表气象和太阳能的数据库

NASA 的 SSE 是一个关于世界上各区域太阳日照（也有雨和

风）信息的交互式数据库（见图 10.8）。它拥有 200 多个太阳能和气象参数 10 年来的平均数据。一个月内根据用户的需求能生成超过 1 000 000 张地图。用户可以在页面下端选择需要的信息，然后根据这些信息选择相应的年限和地区。网站地址为 http：//eosweb.larc. nasa. gov/sse.

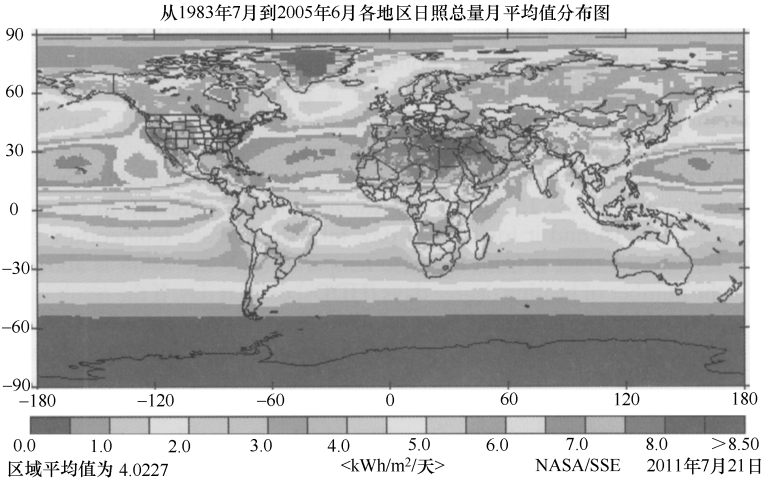


图 10.8　在 NASA 提供的免费交互式数据库上可以输入全世界范围内某个区域某个月，就可以得到类似该区域这个月内平均有多少云的信息（资料来源：PVGIS，NASA：www. eso. org/gen-fac/pubs/astclim/espas/world/ION/ion-cloud. html）

10.1.5　METEONORM

METEONORM 宣称自己是一个为工程师，规划师和教育工作者服务的全球气象数据库。当想在全世界内任何地方设计太阳能的应用和系统设计时，都可以结合它的气象数据和计算程序来作为综合气象参考。在为能源应用提供气象数据库的发展过程中，METEONORM拥有超过 25 年的经验，它有 28 种不同的输出格式，同时用户也可以自定义输出格式。可以在网上向 Meteotest 购买这项服务，网址为 www. meteonorm. com。

10.1.6　TRY

TRY（Test Reference Year）文档能提供外部气候的年度概况，如环境温度、风向和风速、降水、直接和散射辐射。TRY 文档的一个很好的免费来源是美国能源部网站：www. eere. energy. gov/buildings/energyplus。这个网站能提供全球范围内很多地区每小时的气候数据，输出格式是 . epw。

10.1.7　度日（degree days）

为了计算出建筑物供暖（供冷）需要的能量，度日是供暖（供冷）一个很有用的指标。指定区域有供暖要求的特定结构建筑的度日可以通过观察日常温度来获得。它可以作为一个粗略的方式来预测某个指定时期内所需要能量。

热度日是根据基底温度算出来的。在英国，惯用的基底温度是 15.5℃，德国是 17℃。将某个地区任一天内的平均温度减去该地区基底温度就可以得到该地区该天的度日。如果结果大于 0，就称为该天的热度日（HDDs）。如果结果小于等于 0，则忽略不计。把一年里每一天的热度日数加起来就可以得到这些天里所需要的总热度数。

举个例子，某个区域某天的最高温度为 14℃，最低温度为 5℃，平均温度为 8.5℃。15.5℃减去 8.5℃得到这一天度日数为 7℃。一个月 30 天近似得到 $7 \times 30 = 210$，一年（包括平均温度高于 15.5℃的夏季）总和约为 2000。假设建筑所需的供热速率和它散热速率是一样的。这个速率（定义在每 1℃上的温差）等于建筑物的 U 值（建筑上所有元素例如门窗屋顶等的 U 值的平均值）乘以建筑物的外表面的面积。

把建筑物散热速率乘以散热时间（单位是 h）就等于所损失的热量（单位是 Wh 或 Btu）：也就是热源需要供给的热量（把这个计算结果除以 1000，将 Wh 转换成 kWh 的单位）。因此，如果建筑物外表面（墙、屋顶、地板）面积用 A 表示，平均 U 值用 U 表示，度日数用 D 表示，那么在这期间所需要提供的总热量（单位是

kWh）等于：

$$A \times U \times D \times 24/1000$$

这里乘以 24 是为了得到 kWh 而不是 kW-days。在美制单位换算中（不用除以 1000），用同样的方法得到的总热量单位是 Btu。

例如，一个建筑物的表面积是 500m^2，平均 U 值是 3.5，度日数是 2000，那么每年所需的供热量为

$$500 \times 3.5 \times 2000 \times 24/1000 = 84000 \text{（kWh）}$$

在需要供热的季节期间，纽约的热度日（HDDs）数是 5050，而阿拉斯加巴罗的热度日数是 19990。因此同样的一栋建筑物，在阿拉斯加巴罗需要的能量比在纽约需要的热量要多 4 倍，然而在热度日数为 2020 的洛杉矶，所需要的能量只是纽约的 40%。同样的方法适用于计算当外界环境温度比所需建筑物内部温度要高时给建筑物供冷所需的能量。这个方法并不简单，因为夹杂着其他因素的影响，如家用电器和人体释放的热量、风力因数、外部遮阳设备等。另外，所需的热量与温度并不成线性关系，而且绝缘性越好的建筑物，所需的热量就越少。

注意：当用到度日指标比较不同国家的气候时要注意到不同的国家的基底温度可能不同。美国用的是华氏温标，其余地区几乎都是用摄氏温标。

华氏温标下热度日℉ HDD 转换为摄氏温标下热度日℃ HDD：℃ HDD = (5/9) × (℉ HDD)

摄氏温标下热度日℃ HDD 转换为华氏温标下热度日℉ HDD：℉ HDD = (9/5) × (℃ HDD)

由于热度日（HDDs）和基底温度有关，故进行华氏温标和摄氏温标的相互转换时没有必要加上或减去 32。

当进行供冷和供热计算时，度日法在全球都是适用的，相关网站是 www. degreedays. net。美国的数据可以从气候预测中心得到，相关网址是 www. cpc. noaa. gov/products/analysis_monitoring/cdus/degree_days。可以利用当地气候服务机构提供的气候情况结合网上的软件来计算热度日、冷度日和能源特性（见图 10.9）。

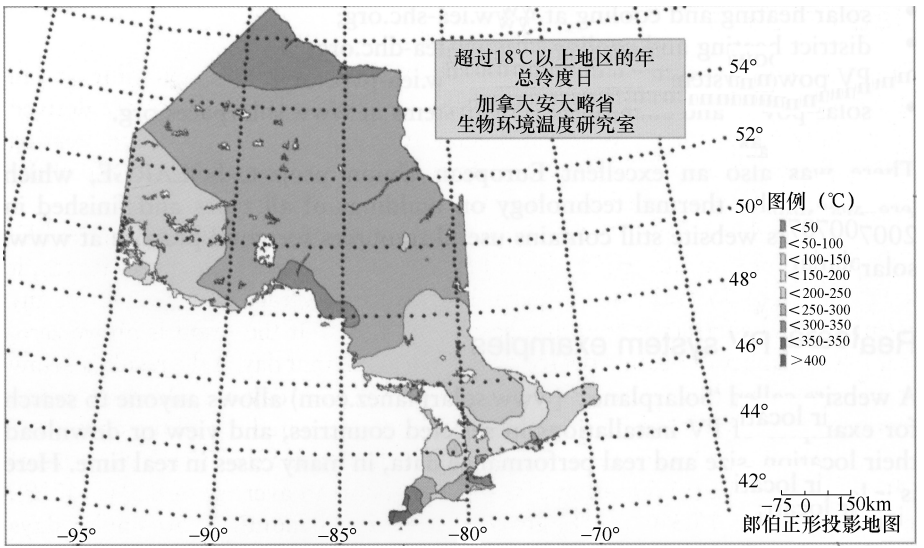


图 10.9　加拿大(18℃以上地区)的冷度日分布图(资料来源:加拿大综合测绘与项目评估中心,网址为 www. can- imap. ca)

10.2 其他网络资源

10.2.1 范例研究和技术信息

当需要进行范例研究，查询优秀技术资料和创新时，最有价值的网上资源来自于 IEA（国际能源署）的特别项目，主要包括以下方面：

1）太阳能加热冷却系统网站：www. iea-shc. org；

2）区域冷暖供应系统网站：www. iea-dhc. org；

3）光伏电力系统网站：www. iea-pvps. org；

4）太阳能热发电和热化学系统网站：www. solarpaces. org。

还有一个优秀的欧盟项目——SOLARGE，该项目促进了太阳能热技术在所有类型建筑上的应用，该项目在 2007 年结束，但是它的网站：www. solarge. org 上还是拥有很多供实践使用的资源。

10.2.2 实时光伏发电系统案例

一个名叫 Solarplanez 的网站（www. solarplanez. com）允许用户查询选定地区安装的光伏装置，可以实时地浏览或者下载很多装置的位置、尺寸等参数数据。举个例子：

位置：瑞士日内瓦

链接时间：2008 年 9 月

海拔高度：414m

额定功率：3120Wc

预期产能：3000kWh/年

实际产能（2009 年）：3297kWh/年

逆变器型号：Sputnik-SOLARMAX SM3000S

面积：24m^2

组件模块：24 × Solar Fabrik-SF 130/4-130

角度：15°（最佳为 34°）（数据来源：PVGIS）

方向：20°/南面（最佳为 1°）（数据来源：PVGIS）

年损失（与最佳情况比较）：4.35%（数据来源：PVGIS）

安装商：Solstis 公司

10.3　印刷资源

10.3.1　图书

Martin, C. L. and Goswami, D. Y. (2010) *Solar Energy Pocket Reference*, International Solar Energy Society, Earthscan, London

Haggard, K., Bainbridge, D.A. and Aljilani, R. (2010) *Passive Solar Architecture Pocket Reference*, Earthscan, London

Architectural Graphic Standards, 10th edn., available from John Wiley & Sons, Inc. Publishers. A source of information on sun angles and solar path diagrams for calculating shading and windows.

Hankins, M. (2010) *Stand-alone Solar Electric Systems: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*, Earthscan, London

Antony, F., Durschner, C., and Remmers, K. (2007) *Photovoltaics for Professionals: Solar Electric Systems Marketing, Design and Installation*, Earthscan, London

Deutsche Gesellshaft Fur Sonnenenergie (DGS) (2007) *Planning and Installing Photovoltaic Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers*, Earthscan, London

Laughton, C. (2010) *Solar Domestic Water Heating: The Earthscan Expert Handbook for Planning, Design and Installation*, Earthscan, London

Deutsche Gesellshaft Fur Sonnenenergie (DGS) (2010) *Planning and Installing Solar Thermal Systems: A Guide for Installers, Architects and Engineers*, Earthscan, London

Henderson, S. and Roscoe, D. (2010) *Solar Home Design Manual for Cool Climates*, Earthscan, London

Stapleton, G. and Neill, S. (2011) *Grid-connected Solar Electric Systems*, Earthscan, London

10.3.2　杂志

Renewable Energy Magazine：www. renewableenergymagazine. com

Renewable Energy World：www. renewableenergyworld. com

Home Power Magazine：http：//homepower. com

10.4　仿真工具

下述有关仿真工具的相关介绍并不全面，如果读者需要较为全面的相关仿真程序的介绍，可以浏览美国能源部关于建筑能源软件工具的向导页面，具体网址如下：http：//apps1. eere. energy. gov/

buildings/tools_directory/。这些软件都在不断地更新，在你确定购买某个软件之前建议你根据自己的需求进行充分的了解。

10.4.1 bSol

bSol 是一款能够在考虑该地区特殊气候、建筑所在地特殊地貌以及相关的建筑学参数，如建筑物的朝向和隔热情况、门窗的规格、玻璃的选取、通风设施的作用（包括有或没有热回收）以及建筑物的热惯性等的条件下模拟一个建筑物一整年内热行为的仿真软件。在一幢建筑物内，bSol 能够将其划分为两种不同的温度区域（如可以将其分为加热区域与未加热区域）。同时该软件还能将建筑物热量的各个组分考虑在内，并结合由 METEONORM 提供的相关气候数据（空气温度、全球辐射以及太阳仰角等参数）进行仿真。

bSol 是由瑞士的西部应用科技大学开发的，其相关信息可见如下网站：www. bsol. ch。

10.4.2 DAYSIM

DAYSIM 是一款专门为建筑师、工程师以及调研人员开发的软件，这款软件能够在建筑物的设计阶段帮助用户获得太阳光对建筑物所产生的影响。它能够计算出一年内所有天气条件下（动态仿真）太阳光的照度分布并预测出 PV 系统以及太阳能集热器所接收到的入射辐射，但是这个程序内并不能为这些系统制定具体的参数。要使用该程序用户首先必须了解建筑物在一年内所能接收到的太阳能辐射，并将数据以 TRY 格式的文件输入。DAYSIM 能够直接导入 . epw 格式的文件和提取出进行年度日光模拟所需的相关信息（如全球水平辐射和散射辐射，或者直接和散射辐射等）。尽管通过 DAYSIM 所得到的一些参数对于太阳能的一些其他方面的应用是有帮助的，但这款软件并没有对通过窗户所接收到的太阳能进行特别的计算，也不能对 PV 系统和太阳能集热器的安装进行具体参

数的制定。

DAYSIM 是由加拿大国家研究委员会和德国夫琅禾费太阳能系统研究所合作研究出的一个基于辐射率的采光分析工具。适用于 Windows 系统和 Linux 系统的 DAYSIM 软件版本都能从 www. nrc-cnrc. gc. ca/eng/projects/irc/daysim/download. html 上免费下载得到。

10. 4. 3　EnergyPlus

EnergyPlus 能够对建筑内的加热系统、制冷系统、照明系统、通风系统以及其他能流过程如水流等进行模拟。这款软件中包含了许多新颖的仿真功能，例如可以设置小于 1h 的时间步长、模块化系统结合热平衡区域模拟、多层气流分析、热舒适程度分析、水的利用、自然通风情况的考虑以及对相关 PV 系统的分析。由于 EnergyPlus 是一款独立的仿真程序，所以其图形界面并不易于操作，可以通过购买其他软件来获得更为方便的操作界面，相关软件包括 DesignBuilder（下文也将提到）。此外，EnergyPlus 还能够以一定的文件格式实时获取各个地方的天气状况。

EnergyPlus 这款软件由美国政府提供，其下载地址是 http：//apps1. eere. energy. gov/buildings/energyplus。

10. 4. 4　DASTPVPS

DASTPVPS（Design And Simulation Tool for PhotoVoltaic Pumping Systems，一款专门对光伏水泵系统进行设计和仿真的软件）这款软件能够为技术设计者提供相应的仪器系统设计，并能对光伏水泵系统的性能进行检测。这款软件所使用的文本格式为 Excel 电子表格。通过对一个经过合理设计的标准化 PVP 系统的工作数据分析表明，其结果与通过这款软件模拟所得到的结果十分符合。

DASTPVPS 这款软件由位于慕尼黑的德国联邦国防军大学开发，其下载地址为 www. ibom. de/dastpvps. htm。

10.4.5 DesignBuilder

DesignBuilder（DBS）是一款对 EnergyPlus（E+）的动态热性能模拟功能的操作界面进行优化后的软件，它具有更为全面的操作界面，并能提供较易使用的 3D 计算机图形软件。它还对 E+的数据输入进行了简化并允许用户预先设定参数以检测建筑物的能源需求、二氧化碳排放量、照明情况以及舒适度。这款软件同样还可以对建筑物内的加热系统与制冷系统的规模进行评估与制定。对于建筑物中的每一个区域，利用 DesignBuilder 以及相关天气数据中的室外最低或者最高的全球温度能够对该区域的加热或制冷所需的负载进行计算。实际应用中 DesignBuilder 能够对建筑物的一些具体情况进行模拟。例如，建筑物周围的风力状况以及建筑物中较大房间内的热运动等。

这款软件还能计算出通过窗户以及玻璃门被动获得的那部分太阳能。同时 DSB 还带有采光模型，通过这一模型可以模拟利用光控系统在家庭电气照明中所节约的能量。

DSB 是由 DesignBuilder 软件有限公司开发，其下载地址是 www. designbuilder. co. uk。

10.4.6 Design Performance Viewer

Design Performance Viewer（DPV）这款软件允许工程师以及规划师在建筑物的设计阶段对该建筑物的能量以及放射本能损耗（放射本能是建筑物在与周围环境达到同样的温度的过程中所消耗的能量）进行计算。该软件可以帮助用户将不同的技术和建筑系统相结合，来测试能量和放射本能损耗策略并建造出更多能源、经济以及建筑学意义上的可持续建筑。目前这款软件的设计者计划对来自 METEONORM 的气候数据进行实时更新，并将 DPV 与 CRB 的数据库进行连接。

DPV 是由 Keoto AG，c/o ETH Zurish 公司的建筑研究所开发，其官方网站为 www. keoto. net。

10.4.7　Ecotect

Ecotect 是一个可以进行图像建立与环境分析的实用工具。它能够对一个 3D 模型进行大量的分析，其中包括阴影部分的设计、光线的反射、相关遮挡物的设计、光路设计、视图与光线、声学效应、热效应、通风系统与气流状况等。同时该程序还能生成与资源管理以及建筑材料对环境影响的相关数据。

Ecotect 是由安德鲁·马什博士和 Square One Research Limited 公司共同研制开发。用户可以通过 Ecotect 的官方网站 www. ecotect. com 进行注册并获得 30 天的试用版。

10.4.8　Energy Design Guide Ⅱ

Energy Design Guide（EDG）Ⅱ这款软件支持用户在建筑设计的初期对那些基本不需要加热和制冷系统的建筑物进行相关设计。当某个建筑需要为制定 HVAC 系统而划分边界时，通过该软件用户只需要对建筑物的加热和制冷需求进行计算（在不盖屋顶的情况下）。这一策略首先要求将建筑物对能量的需求最小化，其次可以通过高效的加热系统和制冷系统来填补建筑物对能量的需求。它包含了三个因素：

1）热损耗 K［W/(m²K)］。

2）太阳光照温度修正系数 γ［m²K/W］。

3）时间常数 τ［s，h］，由热动力学存储容量进行定义。

EDGⅡ由来自苏黎世联邦理工学院（ETH Zurich）建筑研究所的布鲁诺凯尔教授与斯蒂文教授联合开发，有关该软件的详细信息可见 www. energy- design- guide. ch。

10.4.9　ENERGIEplaner

ENERGIEplaner 这款软件在德国已被广泛使用，它能够帮助用户调查并计算一项建筑工程所需的费用，为具体的费用计算奠定基

础。该软件能够将建筑物整修所需费用与能耗减小所节约的费用进行比较。下列能量损耗都在这款软件的计算范围之内：

1）加热过程中产生的损耗。

2）家庭使用热水所造成的损耗。

3）照明造成的损耗。

4）制冷造成的损耗。

5）通风过程造成的损耗（包括空调等）。

BKI ENERGIEplaner Polysun 是该软件的一个扩展模块，它能够通过将 PV 系统所产生的电能与建筑物损耗的能量进行匹配对比来进行光伏仿真。

ENERGIEplaner 是由 BKI 公司负责开发，BKI 是一家德国建筑协会旗下的附属公司。

10.4.10 ENERGY-10

ENERGY-10 是一个能够对十多项甚至以上可持续性设计方案所能产生的能源节约与成本节约进行分析的设计工具。该软件能够通过随时的能量模拟对采光、被动式太阳能加热系统、自然通风系统、隔热系统、门窗、照明系统以及相关机械设备等其他系统的效益进行量化、评估并清晰地描绘出来。它能够通过一个 PV 模块对独立的或与建筑物相连的 PV 系统的性能进行建模仿真。同时它还能通过一个太阳能家用热水模块对系统的实际供水能力进行建模。其程序库（ASHRAELIB）包含了许多预先设定的建筑物（如各类墙壁、屋顶、窗户等）。同时，ENERGY-10 还能够为建筑物内任意位置的窗户大小和悬壁结构制定规格，使其具有最佳的大小与朝向。

ENERGY-10 这款软件是全屋设计指南（Whole Building Design Guide）的一部分，是由国家建筑科学研究院研制，其下载地址为 www. wbdg. org/tools/e10. php。

10.4.11 eQUEST

eQUEST 是一款能够对建筑耗能进行仿真的软件。这款软件将

建筑向导、节能向导与带有最新版本 DOE-2（DOE-2 是一个命令行程序，它使用户能够使用 DOE-2 的建筑描述语言来输入文档）仿真引擎的图形报告工具相结合来为用户提供服务。它能够帮助用户处理那些将对能源利用产生影响的因素，例如：

1）相关建筑学设计。

2）HVAC 装置。

3）建筑物的类型与规模。

4）楼层的设计。

5）建筑材料的选取。

6）空间的居住与利用率。

7）照明系统的设计。

这款软件能够在考虑建筑物墙壁、门窗、玻璃材质、居住人群、插塞载荷、通风系统等具体情况下，计算一年中每个小时内建筑物的加热负载与制冷负载。同时 eQUEST 不仅能够对被动式太阳能系统的热增益提供详尽的计算，通过其自带的 PV 模块用户还能够对主动式太阳能系统进行相关设计，这使得我们能够确定电池与其背面之间的电压、角度、距离以及温度。尽管如此，这款软件还是不能对太阳能热系统的一些实际情况进行建模。除上述功能之外，eQUEST 还能够对天窗与照明控制系统的表现以及建筑物对日光的阻挡所造成的影响进行预测和评估。

eQUEST 是由詹姆斯·J·赫希（James J. Hirsch）与伯克利国家实验室共同开发的 DOE-2 软件中的一部分。可以在能源设计资源网站 www. energydesignresources. com 上免费下载，这个网站是加利福尼亚州基金会的一个名为能源设计资源的组织的官方网站，这个机构为高能源利用率建筑物的设计、建造和运行提供决策工具和资源平台。

10. 4. 12　Green Building Studio

Green Building Studio（GBS）是一个能够对整个建筑的相关能源系统进行分析的工具。用户可以对建筑物进行分类以及对其地理

位置进行选定，软件自带的程序库中含有相应的大量模拟参数（如建筑物构造、遮挡区、内部热增益、渗透效应、HVAC 系统、相关设备以及其他相关因素）。用户可以用它估算出建筑物的各个组成部分对能源利用的影响，同时这款软件还可以为用户提供关于采光、水资源利用率、能源以及气候等一些奖励的能源与环境设计先锋奖（LEED）报告。

LEED 是一个由美国绿色建筑委员会（USGBC）所开发研制并受到国际公认的绿色建筑认证系统，它能够对建筑物在提高能源和水资源利用率，降低 CO_2 排放量、室内环境质量以及资源分配与管理等各方面的设计和建造进行认证。该评价系统对各个因素对能源利用的影响极其敏感。

Design Alternative feature 能够帮助用户确定一些对提高能源利用率有帮助的改进，但是 GBS 并不能提供相应的模型化工具，并且它只在美国本土适用。

GBS 是由 Autodesk 提供的一个基于网络服务的能源分析工具，通过购买就能够获得不受限制的网络服务。

10.4.13 IDA ICE

IDA ICE 是一款用于预测与优化建筑物加热负载与制冷负载、能源损耗以及热舒适的仿真软件。它能够对周围环境气候、建筑物、整个建筑系统以及居住人群之间的动态交互进行计算。软件中设置的变量可以是资源的消耗（如能量、二氧化碳）、舒适度指标（温度、运行温度、高温持续时间、湿度、二氧化碳浓度、Fanger 舒适度值等）。软件还可以对太阳能获取度、遮蔽物、主动式太阳能系统的相关数值进行运算。IDA ICE 同时还带有对 PV 系统和太阳能热系统进行模拟的相应模块，但是以普通用户的权限不能对它们进行具体的操作。

IDA ICE 是由位于斯德哥尔摩的 EQUA 仿真技术工作组 AB 所开发出的一款软件，相关信息可见 www. equa. se。

10.4.14　Virtual Environment

Virtual Environment（VE）PRO 是一款由一系列具有相同几何模型的模块所组合而成的软件。这些模块既可以通过利用热平衡方法对能源进行仿真也可以通过简化的 CFD 模块对原本复杂的光线进行分析，因此通过这款软件基本上可以对建筑的各个方面进行相关的分析。从 VE 中得到的相关结果数量非常巨大，其中包括舒适度、不同辐射温度等。

VE 是由位于苏格兰的环境综合研究所（IES）开发，其相关信息可见 www. iesve. com。

10.4.15　PHPP

PHPP 能够为设计者设计出能源需求量每年仅为 15kWh/m^2 的被动式标准的建筑物提供全面的方案。这款软件是通过将其模拟与预测的结果与成百上千的实际被动式建筑进行对比而开发出来的。它能够为用户提供：

1）相关能量的计算（包括 R 值和 U 值）。

2）窗户的设计。

3）室内通风系统的设计。

4）加热负载的制定。

5）制冷负载的制定。

6）对于夏季舒适度的预测。

7）对于加热系统和生活热水（DHW）系统的制定。

8）辅助电力设备、初级能源需求（循环泵等）以及二氧化碳排放的计算。

9）能够为 KfW 和节能法规（Energy Conservation Regulations）以及德国能源效率建筑规范（欧洲）的计算证明提供检验。

10）新增了许多工具，例如能够确定内部加热负载的计算工具以及初级能源相关因素数据表等。

11）一份全面的用户操作手册。

来自东欧、澳大利亚、瑞士以及其他许多欧洲城市的气候数据都包含在这个软件中，其中美国版的包含了 40 个美国城市。用户们可以从他们自己的设计方案中将测量标准、材料的规格与其他数据输入 PHPP 中，之后通过运行程序得到仿真结果。PHPP 要求所有与面积、深度、角度以及直径有关的数据，包括各个框架、门窗内侧、玻璃以及每个外部遮挡物等的相关信息，其中包括部分从建筑物延伸到马路上的结构以及路边的树木等。

PHPP 是由工作于德国被动式建筑研究所的沃尔夫冈菲斯特博士所开发，可以很便宜地从网上购买得到，购买地址分别为 www. passivhaus. org. uk、www. passivhaus. us、www. passivhaustagung. de。

10. 4. 16　Polysun

Polysun 是用于对系统利润率（设计初期）进行估算，同时可以对系统进行优化（系统已经具备了详细的设计方案）的一款软件。它自身带有一个功能全面的太阳模拟引擎，该引擎对热力学和光伏物理学有着深入的表征。这款软件的特殊之处在于它能够将太阳能热系统、光伏系统与热泵的应用相结合进行研究，通过这款软件能够方便地对光伏系统的规模进行制定。Polysun 的模拟运算是建立在动态仿真模型与相关的统计学气候数据上的，所以它对于系统的设计和优化、质量控制以及市场支持是非常有帮助的。由于它带有太阳能热系统仿真功能，所以它经常运用于建筑物的翻新工程中，同时它还带有自动逆变器匹配与精确的收益预测系统。Polysun 的数据库中还内置了 PV 模块、逆变器、太阳能集热器、加热组件等装置的目录。通过 Polysun 还可以进行对遮挡物的分析，下文将介绍的软件 PVsyst 对这一方面的计算更为精确。

Polysun 是由瑞士的一家私人公司 Vela Solaris AG 开发并销售，该公司是从瑞士拉珀斯维尔大学的太阳能技术研究所独立出来的。这款软件的详细信息可见 www. velasolaris. com。

10.4.17　PVsyst

PVsyst 是一个用于对整个 PV 系统进行全面的研究、模拟、规模制定以及数据分析的软件包。在设计初期，PVsyst 一般被用于对系统进行初步的规模认定。同时它还能够对 PV 系统每个月的输出进行估算，并在经济上对系统进行初步的评估。在一个项目的设计阶段，这款软件能够对模拟过程中每个小时内产生的数据进行运算，并且支持用户对 PV-field 进行自定义并选择正确的相关组件。使用者可以将来自 METEONORM、Satel-Light、US TMY2 以及 HelioClim-2 每小时的气象数据导入 PVsyst 中，同时还可以将 METEONORM、WRDC、NASA-SSE、PVGIS-ESRA 以及 RETScreen 每个月的气象数据导入其中。PVsyst 能够输出相关的太阳几何数据（太阳的轨迹、入射角等）以及各个组件的相关图表（包括光伏模块、电池、水泵等），同时还可以输出每个小时的气象数据点并对太阳光对倾斜平面的照射情况进行运算模拟。对于水泵系统的仿真，用户首先必须设定水的需求量和水泵的工作条件，而在系统设计的初步还需要对水泵以及光伏系统的功率进行一些估算。

PVsyst 是由 ISE 以及日内瓦大学联合开发并提供的。用户可以在 www. pvsyst. com/5. 2/index. php 上下载得到一个该软件的 15 天试用版。

10.4.18　PV * SOL

PV * SOL 是一个可以对 PV 系统进行设计和仿真的程序，它能够通过多种模块对 PV 系统进行设计并且根据屋顶的设施及布局对 PV 系统的规格进行制定。

在检测所有的相关物理参数之后，该程序将会为用户挑选并展示最合适的逆变器和 PV 阵列结构。同时程序还能够为用户评估系统的价格，包括相关电子产品的价格以及其分期付款的清偿期。PV * SOL 是以每个小时的平衡作为其运算条件，而相应 PV 系统的输出是以数据库中每个 PV 模块的特性曲线为基础而得到的。程序可以从近

650 个欧洲各个地区获得计算光照所需的气象数据以及大气温度数据。同样，PV * SOL 也支持来自 TRY 和 METEONORM 的气象数据的导入，并且也能进行相关的遮挡物分析。如果有部分区域每个月的气象数据获取失败，那么可以尝试从 NASA 的官方网站进行下载。

PV * SOL 是由来自德国柏林的瓦伦汀能源软件股份有限公司开发（公司官方网站为 www. valentin. de），其免费下载地址为 www. solardesign. co. uk。

10. 4. 19 Radiance

Radiance 是一系列在照明系统的设计过程中能够为用户提供分析与光路模拟的仿真软件。它能够在任意天气条件或电器照明条件下对一个较为复杂的建筑物内部或者边界区域进行亮度和光照分布的相关模拟。Radiance 能够运用递归算法对室内的光线追迹并积分计算房间的亮度，同时它还能够通过自带的引擎对太阳光在不同表面的照射情况进行精确的运算。Radiance 进行的仿真过程能够以小时为单位不间断地进行。如果用户需要全年甚至更为长期的仿真，那么可以使用 DAYSIM 程序。Radiance 并不包含对被动式太阳能系统的热增益以及对主动式 PV、ST 系统进行规模定制的相关算法。

Radiance 是由劳伦斯伯克利国家实验室的格雷格沃德开发，其免费下载地址为 radsite. lbl. gov/radiance。

10. 4. 20 RETScreen

RETScreen 这款仿真工具能够对能量的产生、节省、消耗、排放量减小和相关的财政可行性以及对多种可再生能源与高效能源技术的利用进行一个综合的评估。这款软件中包含了相关的产品、项目、水文地理与气候数据库，同时还自带了一份详细的用户手册、一套基于案例分析的大学培训教程以及一份工程管理手册。

RETScreen 软件本身并不能对被动式太阳能系统的热增益进行运算，在程序的产品选择这一选项中，用户可以对 PV 产品进行具

体的选择，同时使用该软件的过程中用户需要自行对 PV 模块的发电量进行定义。RETScreen 对于热水系统的模拟所采用的方法与 ST 系统类似。所以用户可以通过 RETScreen 对主动式太阳能系统进行模拟，但是却不能得到软件对于太阳能的具体运算。

RETScreen 是由加拿大自然资源部联合工业、政府和学术界各个领域的专家所开发的一款清洁能源项目分析软件。这款软件可以在 www. retscreen. net/ang/home. php 上对它进行免费下载，它实际上是一款基于 Microsoft Excel 上的应用软件。

RETScreen 软件的太阳能水热系统模块能够在各个场合被运用于对能量的产生、节省、消耗、排放量减小和相关的财政可行性以及对多款可再生能源与高效能源技术的利用进行评估。该模块不会对项目类型及规模进行限制，具体项目可以从小规模家用热水系统的太阳能集热器到民用或商用的室内外的泳池系统，甚至包括水产养殖过程中涉及的相关系统。

这款软件自身带有一个不同场所对热水需求量的数据库，其中场所主要包括普通家庭、公寓、客栈以及汽车旅馆、医院、办公室、饭店、学校、洗衣房以及汽车清洗站等。这款软件（软件本身支持多国语言）同时还自带了与产品、项目以及气候相关的数据库和一份详细的用户手册，用户可以从 www. retscreen. net/ang/g_solarw. php 上下载其免费版。

10. 4. 21　T * Sol

T * Sol 是一款可以对太阳能加热系统进行仿真的仿真软件，它可以对水热系统、气暖系统以及泳池加热系统进行仿真。该软件能够对包含数据库组件的不同结构进行模拟，同时还能够通过独立的系统对基本的组件（例如 1200 种不同的集热器）和参数进行修改。在自动设计助手的帮助下，软件将会自动优化集热器的面积以及蓄水箱的容量。在垂直方向上的部分遮挡物或者其他如树木、建筑之类对设计造成的影响以及不同的能量消耗模式都被考虑在内。除了对太阳能热系统进行初步的估算外（系统所产生的能量、工

作效率等），程序还能够对系统的经济效益进行运算。用户还可以通过使用与 PV * Sol 所使用的一样的气候数据来对系统进行运算，运算结果与通过使用 PV * Sol 运算所得的结果相似。

T * Sol 的供应商是由来自德国柏林的瓦伦汀能源软件股份有限公司（公司官方网站为 www. valentin. de），其免费下载地址为 www. solardesign. co. uk。

10. 4. 22　THERM

THERM 能够帮助用户确定窗户类产品的 U 值与 R 值，还能够通过门窗、墙壁、地基、屋顶、电器用具以及其他具有热桥效应的结构的二维模型来得到相应结构的太阳能系统的热增益系数。THERM 还可以对产品的能效、局部温度、凝结、湿害以及结构完整性进行一个综合的评估。THERM 这款软件会为用户生成如图 10. 10 所示的横截面、等温线、彩色的红外热成像截面图等图表，而它对热传导的分析可以作为对设计能效以及局部温度分布图进行估算的依据。

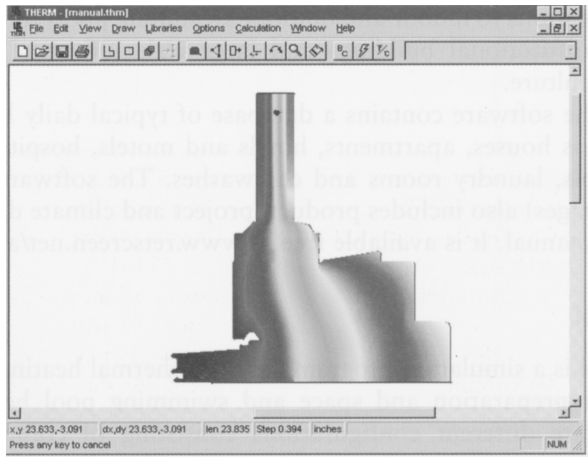


图 10. 10　THERM 软件的一张截图。该图是关于通过框架热流热量的横截面图。蓝色表示温度低，红色表示温度高。该软件给出了通过框架的热流情况从而得到该建筑的储热效率

THERM 由劳伦斯伯克利国家实验室研发，它的下载地址为 http：//windows. lbl. gov/software/therm/therm. html。

10. 4. 23　VisualDOE

VisualDOE 是一款用于精确评估建筑设计方案性能的仿真软件，它自身包含了所有主要的建筑系统，其中包括照明系统、采光系统、HVAC 系统、水热系统以及建筑物的外围系统。用户通过这款软件可以获得关于相关电气消耗量、电力需求量以及成本效益的模拟结果。软件可以对每个小时的数据进行分析与运算并得出相应的结果。同时这款软件还可以为用户提供 LEED 认证所需的相关能量运算数据，并可对屋顶、外墙、门窗、内部增益等对太阳辐射吸收进行仿真和报告。

由于 PV 系统所产生的能量可以在建筑物的使用与负载能量剩余的情况下自由地进行加减，所以能量的总 kWh 值可以通过 PVWatts 进行分析，用户仅仅需要输入一些基本数据，如实际面积、AC-DC 降额、建筑物所在区域（纬度等）以及系统的实际安装倾角等。PVWatts 适合在全年范围内对能量分布进行运算，而不适合对每个小时能量的变化进行分析。

VisualDOE 这款软件是由建筑能源公司提供，它的试用版下载地址为 www. archenergy. com/products/visualdoe/。

10. 5　建筑物设计与实际建设中的细节

如何消除建筑物各个组成部分与周边环境之间的热量损耗的详细信息可以在香港 ECDs（UK Energy Saving Trust's Enhanced Construction Details）迷你网站进行查询，具体网址为 www. energysavingtrust. org. uk/business/Business/Housing-professionals/Interactivetools/Enhanced-Construction-Details。

10.6 太阳能热效应

IEA 提供的对太阳能热效应以及制冷效应进行研究的程序下载地址为 www. iea- shc. org。

10.7 利用太阳能进行烹饪

NASA 的表面气象学与太阳能数据库可以查询世界各地是否有充足的太阳光照射以使用太阳能进行烹饪。相关数据表明，在太阳光照度达 4kWh/m^2 及以上的地区就适合用太阳能烹饪。这个数据库的浏览地址为 www. eso. org/gen- fac/pubs/astclim/espas/world/ION/ion- pwv. html。

Solar Cookers International（SCI）的官方网站是 http：//solar-cooking. org。

表 10.1 太阳能信息来源的总结

产品	区域	期限	供应者	温度分辨率	空间分辨率	获取方式	价格
NASA	全球	1983-2005	NASA	日平均报告	100km	eosweb. larc. nasa. gov/sse	免费
METEONORM	全球	1981-2000	Meteotest	合成 h/min	1km（+SRTM）	CD 或者 www. meteonorm. com	410/欧元
SOLEMI	全球	1991- >	DLR	1h	1km	根据要求	视要求而定
HelioClim	全球	1985- >	MINES-Paris Tech	15min/30min	30km/3 ~ 7km	www. helioclim. org	视要求而定
EnMetSOL	全球	1995- >	Univ. of Oldenburg	15min/1h	3-7km/1 ~3km	根据要求	视要求而定
Satel- Light	欧洲	1996-2001	ENTPE	30min	5 ~7km	www. satellight. com	免费
PVGIS	欧洲	1981-1990	JRC	日平均报告	1km（+SRTM）	re. jrc. ec. europa. eu/pvgis	免费
ESRA	欧洲	1981-1990	MINES-Paris Tech	日平均报告	10km	CD	380 欧元

关于作者

本书作者索普住在英国威尔士中部的戴菲谷，有着《Energy and Environmental Management》杂志10年的新闻编辑职业经历。此前，他是《Centre for Alterative Technology》的作者和总编，在众多领域中编辑了《The Whole House Book》。同时，他也是Earthscan出版社《Sustainable Home Refurbishment》的专家作者。

内 容 简 介

本书主要介绍了利用太阳能进行加热、制冷和发电的相关技术，详细分析了各种太阳能建筑、太阳能供暖、光伏发电和其他拓展应用及其控制技术；并以图文并茂的形式和生动翔实的实例解释了各种太阳能技术设备的工作原理及其一般使用原则和方法；论述了太阳能在节能环保中的重要作用。本书可让读者了解如何充分利用太阳能绿色资源及其内涵和意义。

本书内容详实，实用性强，可供太阳能建筑、太阳能供暖和太阳能发电产品的设计、生产和开发等相关技术人员使用，同时可作为太阳能技术产品在安装和运行维护过程中的参考用书，还可作为节能减排和环保相关领域的太阳能应用技术知识普及的培训用书和参考教材。

上架指导 工业技术/新能源
上架指导 工业技术/电气工程
ISBN 978-7-111-43991-2
策划编辑◎张俊红
电话服务
社服务中心：010-88361066
销售一部：010-68326294
销售二部：010-88379649
读者购书热线：010-88379203
CRC Press
Taylor & Francis Group
地址：北京市百万庄大街22号
邮政编码：100037
网络服务
教材网：http://www.cmpedu.com
机工官网：http://www.cmpbook.com
机工官博：http://weibo.com/cmp1952
封面无防伪标均为盗版
ISBN 978-7-111-43991-2
9 787111 439912 >
定价：49.80元